Biblioteca Universale Laterza

Ronchi

Storia della luce

Da Euclide a Einstein

Biblioteca Universale Laterza

Che cos'è la luce? Come avviene la percezione delle forme, dei colori, della posizione dei corpi? Fin dall'antichità gli uomini hanno cercato di dar risposta a queste domande. Con grande rigore ma con linguaggio piano e accessibile a tutti, Ronchi ripercorre la storia della scienza ottica, da Euclide a Lucrezio, da Galileo a Cartesio, da Newton alle più moderne concezioni.

CL 20-2249-4

Vasco Ronchi (Firenze, 1897) è la massima autorità italiana nel campo dell'ottica. Nel 1927 ha fondato l'Istituto nazionale di ottica, che ha diretto fino al 1975, ha tenuto corsi presso varie università e ha collaborato a riviste italiane e straniere. Numerose le sue pubblicazioni, tra cui «Galileo e il suo cannocchiale» (Torino 1958).

ISBN 88-420-2249-7

Lire 20000 (i.i.)

Vasco Ronchi

STORIA DELLA LUCE

DA EUCLIDE A EINSTEIN

Editori Laterza 1983

I lettori di questa nuova edizione della *Storia della luce*, con molta probabilità, non ne conoscono l'evoluzione nel corso delle edizioni precedenti, perché per la maggior parte essi non erano ancora nati nel 1939, anno in cui comparve la prima edizione, o, se anche erano nati, non avevano un'età sufficiente per interessarsi di un argomento così astruso. Perciò qualche notizia sulla storia della *Storia della luce* potrà loro giovare, anche perché contribuirà a far comprendere loro quanto sia stato grande lo sforzo compiuto dai filosofi e dagli scienziati di tutti i tempi per rendersi ragione mediante una teoria accettabile di un fenomeno così misterioso e così meraviglioso, come quello di vedere davanti a noi uno spazio ripieno di figure luminose e colorate, distribuite in profondità fino alla volta celeste.

Le ricerche su questo argomento, da parte mia, ebbero inizio nel 1934, per iniziativa di un compianto pioniere della storia della scienza in Italia, Federico Enriques, con cui presi l'impegno di consegnare il manoscritto di un volume entro due anni. Ma dopo due anni non fu consegnato nessun manoscritto, perché la conclusione delle ricerche compiute era soltanto che la mole del materiale da prendere in considerazione era enormemente superiore a quella che era stata prevista.

Arrivati al 1939, anche in considerazione del minaccioso orizzonte internazionale, fu deciso di pubblicare il materiale raccolto, anche se a noi si presentava largamente lacunoso. Ci si proponeva di continuare le ricerche negli anni futuri per mettere insieme un'opera meno incompleta. Fu così che venne pubblicata la prima edizione della mia *Storia della luce*, in un volumetto di 218 pagine, del formato 13,0 x 20,5 cm. In meno di un anno fu esaurito.

Nonostante il periodo bellico iniziatosi alla metà dell'anno successivo, continuai le mie ricerche con risultati sempre più interessanti. Siccome nel 1945, in seguito alla perdita del mio figlio Giorgio, per eventi bellici, istituii la Fondazione dedicata alla Sua memoria, e iniziai la pubblicazione di una rivista, col titolo di « Atti della Fondazione GIORGIO RONCHI », la ritenni sede opportuna per pubblicarvi la 2ª edizione della *Storia della luce*. Il periodico era bimestrale. Nel nº 3 del vol. IV (1949) comparve la prima puntata e tutti i 15 fascicoli successivi ne contenevano una, fino al nº 6 del 1951. Nel 1952 tutte le 16 puntate furono raccolte in un volume di 285 pagine del formato di 16,5 x 24,0 cm. Il suo contenuto era più che doppio di quello della prima edizione, perché vi era aggiunto il frutto delle ricerche dal 1939 al 1951.

Una edizione in francese fu pubblicata a Parigi nel 1956: rispetto alla seconda edizione italiana era accresciuta di circa il 10%. Una edizione in inglese fu pubblicata congiuntamente a Londra e a Boston (U.S.A.) nel 1970: superava quella francese di circa il 20%.

Sono trascorsi altri 12 anni e la nuova edizione italiana si presenta ancora aggiornata e accresciuta, perché anche in questi ultimi anni si sono trovate novità interessanti. Credo opportuno segnalare specialmente due argomenti, che hanno particolari caratteri di novità.

Il primo argomento riguarda ancora l'annosa storia della invenzione delle lenti e degli occhiali, sulla quale ha avuto un'influenza determinante una procedura nuova circa la documentazione. Notizie circa tale storia erano state sempre ricercate, secondo la prassi classica, nella letteratura scientifica e tecnica. Ma per le lenti e gli occhiali non è stata la via migliore. Perché (anche se oggi la maggior parte degli studiosi non lo vuole riconoscere) delle lenti e degli occhiali tutto l'ambiente colto di un tempo non se ne voleva occupare, perché non ci capiva nulla, e qualche osservazione attraverso le lenti, eseguita a caso, dava risultati sconcertanti: ciò ha portato tutti i saggi a condannare le lenti come ordigni fallaci e indegni di studio e di applicazioni. Ne è seguito un ostracismo ufficiale che più assoluto e più completo non avrebbe potuto essere. Anche se le lenti venivano usate correntemente e il pubblico le acquistava nei negozi, adoprandole per accendere il fuoco.

In nessuna opera scientifica antica si trova una notizia del genere, ma si trova in una commedia di Aristofane, del V secolo a. C., perché egli non era uno scienziato e poteva parlar bene delle lenti, senza rimetterci la riputazione. E ciò cambia profondamente la storia delle lenti.

Interviene poi un diplomatico, il prof. V. Ilardi: studiando il carteggio degli Sforza di Milano, del XV secolo, trova delle notizie circa le lenti divergenti di quasi un secolo più antiche di quelle note in precedenza. Ciò conferma l'ostracismo fanatico addirittura dell'ambiente colto, contro gli occhiali: non una parola è stata scritta in un testo scientifico circa l'epoca, il luogo e la persona che ha costruito le prime lenti divergenti, e le ha applicate alla correzione della miopia.

Se ora si prendono le mosse dalla notizia che già nel V secolo a. C. le lenti convergenti si vendevano al pubblico, si arriva a dare un significato nuovo alla invenzione degli occhiali per i vecchi, avvenuta ben diciotto secoli dopo: la scienza e soprattutto la filosofia consideravano un dogma infallibile quello che vietava di guardare attraverso le lenti, considerate ordigni fallaci. Quando qualche vecchio artigiano le ha avvicinate agli occhi, vi ha guardato attraverso e ha scoperto un miracolo: ha visto nitidamente gli oggetti vicini, come quando era giovane. Ma la scienza non l'ha voluto riconoscere, perché non ci capiva nulla; non ha voluto riconoscere che dei « vetri cavi » di nuova invenzione, avvicinati agli occhi dei miopi, facevano veder bene anche le cose lontane.

Perché il terribile ostracismo contro le lenti e contro gli occhiali, che aveva portato all'umanità danni colossali, dato che aveva dominato almeno da due millenni, fu schiantato soltanto tra il XVI e il XVII secolo dell'era volgare; ma anche sul modo, sul tempo in cui ciò è avvenuto e per merito di chi, fino ad ora è regnata molta incertezza, perché dell'argomento si è parlato il meno possibile, come se il mettere in evidenza che tre secoli fa è nata una scienza nuova sulle macerie di una scienza precedente, professata per millenni, costituisse una vergogna e diminuisse il prestigio della scienza in generale. Anche da parte degli storici della scienza si è evitato di esaltare la grandiosa rivoluzione che ha portato alla scienza moderna, lasciando nell'ombra il contributo dei valenti riformatori, e lasciando che nel pubblico si affermasse la convinzione che la scienza di oggi sia stata quella di sempre durante tutto il passato conosciuto.

È questo il secondo argomento che vale la pena di segnalare, perché in questa nuova edizione viene sviluppato secondo l'apporto della riesumazione di una documentazione, di cui si era persa ogni traccia. Mentre nelle edizioni precedenti era stata valutata come determinante l'opera del Keplero, ora viene riportata al suo valore reale, sempre importante, ma solo come sviluppo di quella di un predecessore di almeno mezzo secolo, cioè di Francesco Maurolico da Messina, a cui si debbono le idee nuove tuttora ritenute fondamentali per l'ottica di oggi.

Per quanto si possa affermare che la ricostruzione storica esposta in questa edizione è quanto di meglio si può mettere insieme sulla base della documentazione nota fino ad oggi, non si può escludere del tutto che possano venire alla luce nuovi documenti che ne impongano, se non delle modificazioni profonde, almeno dei perfezionamenti non trascurabili.

Ma più interessante è un'altra considerazione: le influenze filosofiche rilevate nel corso della esposizione dei fatti si sono rivelate eccessivamente faziose e ciò provocherà a breve scadenza una revisione delle idee fondamentali, che portino a una scienza della luce più concorde coi risultati delle esperienze moderne.

Vasco Ronchi

STORIA DELLA LUCE

Capitolo primo

L'OTTICA NEL MONDO GRECO-ROMANO

« 3. Dixitque Deus: Fiat lux. Et facta est lux ».

Il Creatore comincia l'opera immensa della creazione col dare al cielo e alla terra questa grande cosa: la luce.

Qualunque sia la fede e la filosofia di chi considera questa circostanza, non può mettersi in dubbio la poesia profonda contenuta nelle prime frasi della *Genesi.* La luce costituisce per il mondo qualche cosa di basilare, di vitale, che caratterizza il principio della vita e dell'ordine, in contrapposto alle tenebre del caos, del disordine, della morte. Senza la luce, la terra era « inanis et vacua » [1].

Si ritrova lo stesso motivo nella frase con cui anche oggi si indica la nascita di un essere nuovo: venire alla luce.

È ancora più notevole questo passo della *Genesi*, perché assegna alla luce una precedenza assoluta di nascita: precedenza sul sole [2] creato nel 4° giorno; precedenza sull'uomo, creato nell'ultimo giorno.

[1] Ecco i primi versetti dell'*Antico Testamento*:

1. In principio creavit Deus coelum et terram.

2. Terra autem erat inanis et vacua, et tenebrae erant super faciem abyssi: et spiritus Dei ferebatur super aquas.

3. Dixitque Deus: Fiat lux. Et facta est lux.

4. Et vidit Deus lucem, quod esset bona: Et divisit lucem a tenebris.

5. Appellavitque lucem diem, et tenebras noctem. Factumque est vespere, et mane dies unus.

Così era compiuto il primo giorno del mondo.

[2] Sono interessanti i versetti relativi alla creazione del Sole:

Notevole perché in questa circostanza e in questo frasario è già implicita una teoria sulla natura della luce; teoria che le attribuisce un'esistenza a sé indipendentemente da chi la emette e da chi la vede.

Le Tavole dell'*Antico Testamento* fanno capo a una civiltà orientale, che soltanto con l'avvento del Cristianesimo conquistò l'Occidente europeo. Sarebbe certo molto interessante esaminare i monumenti storici dei varii centri di irradiazione delle antiche civiltà, perché con tutta sicurezza vi si troverebbe l'espressione delle idee e delle teorie che i saggi del tempo avevano formulato a proposito della luce. Purtroppo questa indagine ci è stata possibile per un centro solo: quello greco; che per altro è un centro di primaria importanza.

È ben noto che nei secoli V e IV avanti Cristo la filosofia greca attraversò un periodo portentoso, che anche dopo ventiquattro secoli è oggetto di studio e di ammirazione, e non soltanto da parte degli storici. I nomi dei saggi di quel periodo fortunato sono a tutt'oggi simbolo di sapienza e di intelligenza quasi divina. Le basi delle scienze filosofiche di allora sono quelle di oggi; non solo il tempo e il progresso non le hanno demolite, ma i successori hanno costruito su di esse e intorno ad esse.

Era inevitabile che i saggi del periodo ellenico rivolgessero l'attenzione anche verso la luce e ne formulassero delle teorie. E invero la messe di lavoro in questo senso è veramente degna della massima considerazione. Dal seicento in poi si è tentato di gettarvi sopra del discredito; però devesi riconoscere che i critici non erano troppo sereni, forse perché abbagliati dai momentanei successi della nuova « filosofia naturale ». Con questo non si vuol affermare che tutte le idee dei filosofi greci siano inattaccabili; ma è un fatto che molto di ciò che è giunto ai giorni nostri regge alla critica più serrata, purché serena e spregiudicata; anzi merita

... 14. Dixitque autem Deus: Fiant luminaria in firmamento coeli, et dividant diem ac noctem, et sint in signa et tempora, et dies et annos.

15. Ut luceant in firmamento coeli, et illuminent terram. Et factum est ita.

16. Fecitque Deus duo luminaria magna: luminare majus, ut praeesset diei: et luminare minus, ut praeesset nocti; et stellas.

17. Et posuit eas in firmamento coeli, ut lucerent super terram.

18. Et praeessent diei, ac nocti, et dividerent lucem ac tenebras. Et vidit Deus, quod esset bonum.

19. Et factum est vespere, et mane dies quartus.

la qualifica di frutto di ragionamenti condotti a stretto fil di logica, non solo con molto buon senso, ma anche con acume.

Piuttosto, se non possiamo apprezzare in pieno l'opera fisica e filosofica sviluppata dai Greci nel campo della luce, molto si deve alla difficoltà di interpretare il vero significato dei monumenti storici che ci sono pervenuti. Purtroppo la maggior parte delle notizie sono di seconda mano, e come tali già viziate da una interpretazione che può averle anche falsate: e ciò con molta probabilità. Le poche notizie dirette sono molto frammentarie e i filologi si trovano spesso di fronte a dei veri rebus quando debbono interpretare dei termini di significato indefinito e molto vasto. Termini che gli autori hanno usato, si può dire con certezza, con un significato ben più ristretto e definito di quanto non risulti dagli elementi etimologici e filologici; i soli, per forza di cose, a disposizione dei traduttori e dei commentatori moderni.

I quali si vengono a trovare in condizioni ben peggiori di chi si accinge a tradurre un testo scientifico, anche moderno, senza possedere nessuna cognizione tecnica della materia che vi è trattata.

Così avviene che nell'interpretare i testi greci, ci troviamo di fronte a dei termini così elastici che in essi si può vedere o non vedere un concetto, a seconda che l'interprete è di buona o di cattiva volontà.

A dire il vero non sembra che i filosofi greci si siano posti nettamente il quesito di determinare la natura della luce: il loro tema era di svelare il meccanismo della visione.

A quei tempi l'argomento base delle indagini più elevate era conoscere l'uomo nelle sue funzioni e nelle sue facoltà. Una di queste era la vista: come si fa a vedere?

E non poteva essere altrimenti. Ogni ente fisico esiste in quanto produce degli effetti; a quell'epoca il solo effetto conosciuto della luce era la visione ed era naturale che lo studio cominciasse di qui.

Prendendo le mosse da quel luminoso V secolo avanti Cristo, nel pieno splendore del periodo cosiddetto « ellenico » della scienza antica, vi troviamo già delle « scuole » e delle « correnti », impegnate nell'indagine del meccanismo della visione. Ciò sta ad indicare che vi deve essere stato un periodo precedente di preparazione; ma non ne tentiamo una ricostruzione neppure sommaria, data la penuria estrema di monumenti storici.

La suddivisione delle idee in queste « correnti » è una schematizzazione possibile a grande distanza di tempo, quando si perde la percezione dei particolari e delle sfumature, e i fenomeni ci appaiono solo nelle grandi linee. Però la situazione più probabile del secolo si presenta come quella di una folla di saggi intenti a discutere sull'argomento che doveva essere considerato della massima attualità e importanza; e pertanto con una gradazione di idee, di ipotesi e di congetture molto sfumata e svariata, anche per l'influsso che i varii sistemi filosofici dell'epoca dovevano necessariamente avere sul modo di considerare il fenomeno.

Si può dire che nel V secolo avanti Cristo vi è stata una affannosa ricerca del collegamento tra l'occhio e la cosa vista; proprio di quel collegamento che ci interessa e che oggi da molti si chiama « luce ». Però non si è giunti subito alla dimostrazione o alla ipotesi che vi dovesse essere questa « luce » oggettiva e collegante l'oggetto visto con l'occhio veggente; perché se oggi si dice così, senza alcuna riserva e senza neppure pensarci, quasi che ciò fosse una realtà evidente, lo si fa appunto in conseguenza del lavoro e delle discussioni di ben due millenni.

Allora, nel V secolo, questo tipo di collegamento tra occhio e oggetto visto veniva considerato, e giustamente, come *una* delle soluzioni possibili, ma non come l'unica; perché, giustamente, si poteva pensare a un collegamento mediante un quid che usciva dall'occhio e andava verso l'oggetto visto; oppure a un quid che dalla cosa vista andava verso l'occhio; e infine a una coesistenza di questi due quid, uno in senso inverso all'altro. Né con questo si esaurivano le soluzioni possibili, perché si poteva pensare anche a un collegamento di tipo diverso, senza moto in un senso o nell'altro, ma soltanto mediante una modificazione del mezzo interposto tra l'occhio e la cosa vista. *Tutte* queste idee furono avanzate per la discussione.

La prima, di un'emissione dall'occhio verso l'oggetto, fu abbracciata dai pitagorici.

Gli atomisti della scuola democritea, naturalmente, si schierarono a favore dell'emissione da parte dei corpi verso l'occhio.

Empedocle fu tra i primi a sostenere una combinazione dei due flussi.

Soltanto nel secolo successivo, la quarta ipotesi si delinea nell'opera di Aristotele, forse come conseguenza della insoddisfazione per le altre idee.

Possiamo dire subito che nessuna di queste correnti ebbe un sopravvento decisivo; e anche molti secoli più tardi troviamo seguaci dell'una e dell'altra, semmai con una certa tendenza a favore delle idee estreme.

La documentazione pervenutaci non permette di seguire la evoluzione delle idee passo per passo, perché è molto disseminata nel tempo. Per evitare uno scollegamento eccessivo, che sarebbe inevitabile qualora ci imponessimo un esame scrupolosamente cronologico dei testi che ci riguardano, tenteremo di ricostruire ogni teoria indipendentemente dalle altre, nel suo sviluppo, anche se questo ci obbligherà a fare qualche passo indietro.

A Empedocle[3] si attribuisce la prima formula del concetto che la « luce » fosse dovuta a un effluvio dei corpi ricevuto dall'organo della vista.

Egli si intrattiene a considerare la struttura della materia e specifica che deve essere porosa, in quanto dotata di pori, ossia di meandri fra le parti solide elementari. Le sensazioni in genere avrebbero luogo quando le particelle adatte emesse dai corpi penetrano nei pori dell'organo sensibile, disposti in modo da lasciarle passare. In particolare, per il senso della vista, la luce sarebbe l'emanazione del fuoco esterno (però non bisogna interpretare queste frasi col significato che oggi hanno le parole contenutevi) elementare e arriverebbero agli occhi, attraverso allo spazio, come *il suono all'orecchio* e l'odore al naso. Però, accanto a questa azione esterna, Empedocle ritiene necessaria un'azione dall'interno dell'individuo, verso l'esterno: « Così il nero e il bianco e ogni altro colore ci appariranno generati dall'incontro degli occhi con qualche cosa che si muove nella direzione degli occhi stessi; e ciò che noi diciamo questo o quel colore non sarà né l'oggetto che viene incontro all'occhio, né l'occhio che è incontrato, bensì qualche cosa che si è generato tra mezzo...

... È necessario che divenendo io senziente divenga senziente di qualche cosa; perché divenir senziente è possibile, ma senziente di nulla, non è possibile. Similmente è necessario che quella data cosa, quando diviene dolce o amara, o d'altro sapore, diventi tale

[3] Nato ad Agrigento in Sicilia, visse tra il 490 e il 430 a. C.

per qualcuno, perché divenire dolce è possibile, ma non dolce per nessuno » [4].

In base a questi ragionamenti e al principio dell'attrazione del simile per il simile, vede la possibilità di una specie di reciprocità, e ritiene che vi debba essere una emissione di raggi dall'interno all'esterno dell'occhio, contemporanea a quella esterna verso l'interno.

Empedocle dunque è nell'ordine di idee di ammettere due flussi: uno esterno, esistente per sé, oggettivo, di natura corpuscolare, portante seco l'ordine, la forma e i colori degli oggetti; ma, tutto sommato, questo non bastava per spiegare ciò che si vedeva: per render conto di ciò che si conosceva a proposito della visione, ci dovevano essere anche dei raggi emessi dall'occhio.

Una interpretazione così schematica e sommaria delle idee di Empedocle, per altro, si presenta molto discutibile, perché i suoi ragionamenti sono molto più vaghi e complessi e le sue espressioni ben difficili a tradursi. Non bisogna dimenticare che siamo in quel periodo della filosofia greca, in cui alle parole acqua, fuoco, terra e aria si attribuivano significati elementari, il cui concetto non è certo espresso dalle parole come vengono intese oggi. Così Empedocle dice che l'interno dell'organo della vista è acqua e fuoco, e l'esterno è terra e aria. Ma più tardi parla di occhi col fuoco interno e di quelli col fuoco esterno e tenta di spiegare su queste basi perché alcuni animali ci vedono meglio di giorno e altri di notte.

Non riteniamo necessario addentrarci in una critica più approfondita di ciò che Empedocle ha voluto dire, con tutti i particolari che sarebbe possibile ricostruire dall'esame accurato di tutti i documenti che lo riguardano. Ci basta di notare l'idea fondamentale, cioè il tentativo di combinazione fra un intervento di particelle materiali esterne e un'azione dall'interno dell'occhio, per mezzo di un « fuoco » (da interpretarsi come spirito, anima o qualche entità ancora meno definita).

Contemporaneo di Empedocle fu Leucippo di Mileto, il cui nome è molto legato con quello di Democrito. Si attribuiscono a Leucippo dei ragionamenti di questo tipo: « Ogni modificazione, prodotta o ricevuta ha luogo in virtù di un contatto: tutte le nostre percezioni sono tattili; tutti i nostri sensi sono varietà di tatto.

[4] Cfr. F. Enriques e G. de Santillana, *Storia del pensiero scientifico*, vol. I: *Il Mondo Antico*, Zanichelli, Bologna 1932, p. 165.

Di conseguenza, siccome la nostra anima non esce dal nostro interno per andare a toccare gli oggetti esterni, bisogna che questi oggetti vengano loro a toccare la nostra anima, passando attraverso i sensi. Ora noi non vediamo gli oggetti avvicinarsi a noi, quando noi li percepiamo; bisogna allora che essi mandino alla nostra anima qualche cosa che li rappresenti, delle immagini, εἴδολα, specie di ombre o di simulacri materiali che rivestono i corpi, si agitano alla loro superficie e possono staccarsene per portare alla nostra anima le forme, i colori e tutte le altre qualità dei corpi da cui essi emanano »[5].

Meno definito appare Democrito[6], almeno attraverso ciò che ne riferisce Teofrasto. Tuttavia si intravede nelle idee che gli si attribuiscono, un seme di interesse particolare. Egli infatti ritiene che « l'aria interposta tra l'occhio e l'oggetto riceva *l'impronta* come conseguenza della compressione esercitata su di lei dall'occhio e dall'oggetto ». Questo concetto rimane però mescolato con altre idee di questo tipo: che da tutti gli oggetti avviene un'emissione continua, e che la sostanza emessa, essendo solida e differente dall'occhio per il colore, si imprime sugli occhi che sono umidi. Egli infatti deve aver notato che sulla cornea si vedono le figurine degli oggetti antistanti. Considera poi particolarmente l'acqua dell'occhio e la spugnosità e la permeabilità delle varie tuniche di questo.

Appare qui per la prima volta l'idea di un « mezzo di trasmissione », seppure l'interpretazione dei documenti non è stata del tutto fuorviata.

Ma prima ancora di giungere a Democrito, la scuola pitagorica aveva avanzato ancora delle altre idee, che andavano ad aumentare la varietà di quelle che già circolavano in quel tempo a proposito del grande mistero della visione.

Infatti, stando a quanto scrive Apuleio, Archita da Taranto[7] amico e contemporaneo di Platone, ed esponente autorevole della scuola pitagorica, riteneva che la visione avvenisse esclusivamente per mezzo di un « fuoco » invisibile, che usciva dagli occhi e andava a toccare gli oggetti, rivelandone la forma e i colori.

[5] Cfr. J. Trouessart, *Recherches sur quelques Phénomènes de la Vision*, Anner, Brest 1854, p. 15.

[6] Democrito di Abdera visse fra il 460 e il 360 a. C.

[7] Archita da Taranto visse fra il 430 e il 365 a. C.

Si direbbe che la discussione portasse col tempo a una definizione di posizioni. Infatti mentre da una parte gli atomisti si irrigidivano nelle idee del tipo di quelle attribuite a Leucippo, i pitagorici venivano a negare ogni influenza esterna e riserbavano all'occhio la facoltà di andare a vedere gli oggetti, emettendo un quid atto a far questo.

Questa idea dei pitagorici ha avuto un seguito incredibile, oggi. Anzi è proprio su di questa che si sono scatenate le critiche dei fisici degli ultimi secoli, i quali fisici ne hanno tratto argomento per dimostrare la modestia, per non dire la miseria, delle cognizioni fisiche del periodo ellenico della storia della scienza.

Noi invece non possiamo mettere da parte l'evoluzione di questa teoria, perché ha avuto un'influenza grandissima sullo sviluppo dell'ottica. Purtroppo la documentazione non ci permette di seguire passo per passo l'evoluzione, ma è un fatto che ritroviamo questi concetti vivi e fecondi in uomini come Euclide, Ipparco, Tolomeo e Eliodoro da Larissa, vale a dire in un periodo di circa sette secoli. Il difficile sta a precisare che cosa Archita intendesse con quel suo « fuoco » invisibile che esce dagli occhi; ma per altro devesi segnalare che espressioni del genere, senza troppe pretese scientifiche, ma con significato non soltanto sentimentale, sono state usate senza parsimonia dai poeti di tutte le epoche, non esclusa quella moderna; e di efflussi uscenti dagli « occhi maliardi » delle streghe e delle belve, dei serpenti o delle innamorate o dei cultori delle scienze occulte è piena la letteratura romanzesca e avventurosa. È mai possibile che in tutto questo non vi sia proprio niente di vero?

Noi ci proponiamo di condurre il nostro studio col minimo possibile di preconcetti; non dobbiamo escludere pertanto dalla considerazione delle idee di uomini di genio, idee che hanno sfidato i secoli, anche se non concordano col modo di pensare del mondo fisico moderno.

Fra parentesi e a titolo di curiosità, facciamo notare a quali diverse conclusioni può portare una interpretazione a seconda che è fatta con molta benevolenza o con molta malevolenza: infatti mentre un critico acido può trovare nelle idee attribuite ad Archita un embrione di teoria, in base alle vedute attuali completamente destituito di fondamento fisico, e quasi ridicolo, o almeno vano e puerile, l'interprete in buona vena vi può riconoscere il meccanismo oggi pienamente e generalmente ammesso della proie-

zione all'esterno delle immagini retinee, per ciò che riguarda il meccanismo della visione; e per ciò che riguarda il campo strettamente fisico, l'interprete benevolo può vedere in Archita il precursore dei fisici relativamente molto moderni, che hanno riunito in un unico gruppo le radiazioni visive e quelle termiche; egli infatti ha ravvicinato il « fuoco » all'agente della visione, cioè alla « luce ».

Su queste teorie si deve essere svolta una discussione intensa e vasta, perché i documenti che ce la rappresentano a intervalli di tempo dimostrano un progresso e una evoluzione dei concetti che si vanno sempre più specificando e definendo. Una riprova dell'interesse che tutti i filosofi dell'epoca dimostravano per l'argomento e della vastità del contributo di pensiero arrecatovi si ha da quanto se ne trova scritto in varii dialoghi di Platone[8].

Nel *Menone* si ritrova la definizione della luce e del colore, proposta da Gorgia[9]: « il colore è l'effluvio del corpo percepibile in corrispondenza alla vista »[10], sulla via segnata da Empedocle.

Nel *Timeo* si trova una espressione di questo genere: « Di tutto quel fuoco che non può bruciare, ma produce la mite luce del giorno, fecero (gli Dei) in modo che esistesse un corpo. Il fuoco puro che sta dentro di noi ed è della stessa natura di questo fuoco del giorno, lo fecero scorrere liscio e denso attraverso gli occhi, costringendo tutte le parti, ma specialmente quelle di mezzo, degli occhi, in modo che trattenessero tutto quello che era più grasso e lasciassero passare solo quello puro. Quando dunque vi è luce diurna intorno alla corrente del fuoco visuale, allora il simile incontrandosi col simile e unendosi strettamente con esso, costituisce un corpo unico e appropriato nella direzione degli occhi, dove la luce che sopravviene dal di dentro s'urta con quella che s'abbatte dal di fuori. E questo corpo divenuto tutto sensibile alle stesse impressioni per la somiglianza delle sue parti, se tocca qualche cosa o ne è toccato ne trasmette i movimenti per tutto il corpo fino all'anima, e produce quella sensazione per cui noi diciamo di vedere. Ma il fuoco visuale si separa dal suo affine, quando questo scompare nella notte; infatti uscendo fuori incontra

[8] Platone da Atene visse fra il 428 e il 347 a. C.
[9] Gorgia da Lentini (Sicilia) nacque nel 480 a. C.
[10] Cfr. F. Enriques e G. de Santillana, *op. cit.*, p. 162.

il dissimile, e si altera e si estingue, né può connaturarsi con l'aria circostante, perché questa non è più. Pertanto l'occhio cessa di vedere... »[11].

Anche nel *Teeteto* troviamo un passo interessante:

SOCRATE Guarda bene intorno, che nessun profano ci ascolti. Intendo per tali quelli che non credono che esista nient'altro al di fuori di ciò che possono afferrare a piene mani e che non considerano come esistente ciò che si fa e ciò che avviene, né nulla d'invisibile.

TEETETO Con ciò tu mi indichi, o Socrate, una specie di uomini duri e intrattabili.

SOCRATE Essi sono effettivamente ben grossolani, ragazzo mio. Ma altri, e numerosi, di cui ti sto per rivelare i misteri, sono più colti. Il loro principio... è che *tutto è movimento nell'Universo*, e che non esiste nient'altro che questo. Ci sono due specie di movimenti; ciascuno è infinito in numero, ma l'uno è attivo e l'altro passivo. Dalla loro combinazione e dal loro urto mutuo si formano innumerevoli prodotti, suddivisibili in due classi: l'oggetto sensibile e la sensazione; la quale coincide sempre con l'oggetto sensibile ed è generata nello stesso tempo. Le sensazioni sono conosciute sotto il nome di visione, udito, odorato, gusto, tatto, freddo, caldo, e ancora di piacere, dolore, desiderio, timore; senza parlare di tante altre, di cui un gran numero non ha nome e un gran numero ne ha uno solo. La classe delle cose sensibili è prodotta per mezzo di ciascuna delle sensazioni, come i colori di ogni specie con la visione di ogni specie, i diversi suoni con gli stimoli dell'udito e le altre cose sensibili corrispondenti alle altre sensazioni... Ciò vuol dire che tutto ciò è in movimento e che questo moto è lento o rapido; che ciò che è lento esercita il suo moto sul posto stesso e sugli oggetti vicini, che egli produce in questa maniera; e che ciò che è così prodotto ha maggior lentezza; che al contrario ciò che è rapido, spostando il suo movimento sugli oggetti lontani, produce in questa guisa, e ciò che è prodotto così ha maggior velocità, perché è trasportato e perché il suo movimento consiste nella traslazione. Quando dunque l'occhio e un oggetto adatto si sono avvicinati e si produce il *chiarore* e la *sensazione corrispondente*, che non si sarebbero mai prodotti se l'occhio si fosse rivolto ad un altro oggetto, o reciprocamente, allora muovendosi queste due cose nello spazio intermedio, cioè: *il fuoco visuale partendo dagli occhi e il chiarore partendo dall'oggetto che produce il colore*, insieme con gli occhi, l'occhio si trova riempito del fuoco visuale, percepisce e diventa non già fuoco

[11] Cfr. *Timeo*, trad. di C. Giarratano, Laterza, Roma-Bari 1982, cap. 16. Cfr. anche U. Forti, *Le concezioni della luce da Democrito a Cartesio*, « Periodico di Matematiche », 1928, p. 92.

visuale, ma occhio veggente: parallelamente, l'oggetto concorrendo anche lui alla produzione del colore è riempito di chiarore e diviene, non già chiarore, ma oggetto chiaro; tanto se ciò che riceve la tinta di questo colore sia legno, pietra o qualunque altra cosa. Bisogna formarsi la stessa idea di tutte le altre qualità, quali il duro, il caldo e così via, e farsi il concetto che nulla di tutto ciò è tale in sé,... ma che *tutte queste cose così diverse nascono dal loro ravvicinamento reciproco, che è una successione di movimenti*[12].

L'interpretazione ristretta e, se vogliamo, maligna di questi brani dei *Dialoghi* di Platone e di qualche altro affine, ha fatto dire a più d'uno, in tono quasi di scherno, che la sua teoria consisteva nell'ammettere due specie di raggi: una dall'esterno, ossia dall'oggetto verso l'occhio e una dall'occhio verso l'oggetto; e che dall'incontro di questi due flussi a metà strada doveva nascere la visione. Messe le cose in questi termini, non meriterebbero certo molto credito. Ma non crediamo che Platone abbia voluto dir questo.

A parte che egli si occupa più del processo sensitivo in generale che di quello visivo in particolare, è evidente che egli insiste soprattutto sul lato psicologico della visione. Egli sente ed esprime la necessità di un agente esterno (il chiarore, che parte dall'oggetto va verso l'occhio, ossia la luce) e di un agente interno (ossia il fuoco visuale) proteso fuori dell'occhio per dar vita e consistenza all'oggetto visto, il quale in tanto è tale, in quanto è il risultato di tutto questo processo.

Con tutte le riserve dovute alla difficoltà di interpretare le parole dell'autore, non si può negare che questo contenuto, come lo intravediamo noi, è sostanzialmente razionale.

È noto per altro che è difficile parlare di una vera teoria di Platone, in quanto nei *Dialoghi* sono riportate le opinioni del tempo. Infatti non vi è molta concordanza fra la definizione della luce attribuita a Gorgia nel *Menone* e l'idea della luce come movimento che risulta dal *Teeteto*.

Questa idea, che la luce avesse una natura meccanica, anziché materiale, accennata in Democrito, come si è visto, e ora già così avanzata in Platone, trova uno svolgimento quanto mai interessante nell'opera di Aristotele[13].

[12] Cfr. Trouessart, *op. cit.*, p. 176.
[13] Aristotele da Stagira (Macedonia) visse tra il 384 e il 322 a.C.

I suoi discorsi non sono proprio chiarissimi e, al solito, gli interpreti vi hanno letto tutto quello che hanno voluto; ma è un fatto che nonostante qualche brano in cui sembra pronunciarsi per una teoria materiale della luce, nella maggior parte di quelli, assai numerosi, in cui tratta della visione [14] egli amplia e definisce l'idea solo abbozzata dai predecessori, che la luce sia un fenomeno di natura meccanica. Conformemente ai costumi del tempo, egli non cita quelli tra i suoi predecessori che avevano avanzato delle idee nello stesso indirizzo, mentre cita senza risparmio quelli contro i quali ha qualche cosa da dire.

Aristotele non accetta l'ipotesi della emissione della luce dall'occhio, idea della quale ritiene colpevole Empedocle. Egli la critica con questi termini nel Cap. II *Dei Sensi* [15].

Ma se l'occhio fosse di fuoco, come dice Empedocle e come è scritto nel *Timeo*; se la visione avesse luogo per mezzo di un fuoco uscente dall'occhio, come per mezzo della luce uscente da una lanterna, perché non ci si deve vedere in mezzo alle tenebre? Dire che questa luce si estingue spandendosi nelle tenebre, come è detto nel *Timeo*, è un ragionamento completamente privo di significato. Infatti come può avvenire l'estinzione della luce? Il caldo e il secco si estinguono nel freddo e nell'umido, e come tali sembrano essere il fuoco e la fiamma che si formano nei carboni incandescenti. Ma né il caldo né il secco sembrano appartenere alla luce. Se vi si trovassero e se ci fossero invisibili a causa della loro quiete, ne verrebbe di conseguenza che in una giornata di pioggia la luce si dovrebbe estinguere, e che in tempo di gelo dovremmo avere le tenebre più profonde. Perché tali sono gli effetti che subiscono le fiamme e i corpi incandescenti. Ora, non avviene nulla di simile.

Dà torto anche a Democrito, che aveva parlato dell'impronta delle immagini sulla pupilla, forse ingannato dalle immagini viste per riflessione sulla cornea. E Aristotele questo lo nota giustamente, sia pure usando termini meno moderni.

Si dichiara contrario anche alla teoria contenuta nel *Teeteto*:

È affatto assurdo sostenere che si vede per qualche cosa che sorte dall'occhio e che questo qualche cosa si estenda fino agli astri o fino a che

[14] Cfr. *Dell'Anima*, Libro II, Cap. VII; *Dei Sensi*, Capp. II e III; *Della generazione degli animali*, Libro V, Cap. I; ecc.

[15] Cfr. Trouessart, *op. cit.*, p. 181.

incontra qualche altra cosa che gli viene incontro, come lo pretende qualcuno. Perché semmai sarebbe preferibile ammettere questa unione dapprincipio, nell'occhio stesso. Ma anche questa sarebbe una sciocchezza, perché non si capisce il significato di questa unione di luce a luce, e non si capisce come potrebbe effettuarsi.

Quanto ai sostenitori della teoria della emissione dei simulacri, nel Cap. III *Dei Sensi* li mette a posto in poche parole, demolendo senz'altro l'ipotesi tattile attribuita a Leucippo: « Quanto a dire, con gli antichi, che i colori sono delle emissioni e che questo è il modo di vedere, è una cosa assurda. Perché bisognerebbe che essi avessero dimostrato prima di tutto che noi sentiamo tutte le cose per mezzo del tatto ».

E conclude: « Una volta per tutte, è preferibile convenirne che la sensazione nasce dal movimento eccitato dal corpo sensibile nel mezzo intermedio, piuttosto che riportarla a un contatto diretto o a una emissione ».

La critica è netta anche se sommaria. In realtà, alle tre teorie precedenti si potevano fare facilmente tante di quelle obbiezioni, che con tutta probabilità anche a quei tempi l'opinione generale doveva ritenere la verità ancor molto lontana. Perciò non c'era un vero bisogno di critica: vi era bisogno di costruire, dopo aver demolito le costruzioni sconnesse dei predecessori. E la costruzione di Aristotele non è così cristallina come la critica. Sembra ai principali interpreti, anche dell'antichità, che egli fosse indirizzato verso l'idea di un movimento propagantesi tra l'oggetto e l'occhio, modificando lo stato dei corpi diafani.

Il corpo diafano al buio è in una condizione potenziale: è diafano in potenza. Lo stesso corpo si dice che è in luce, quando è diafano in atto. Aristotele scrive a questo proposito nel Libro II, Cap. VII *Dell'Anima*: « Pertanto abbiamo detto che cosa sono il diafano e la luce, e come questa non sia né fuoco, né in genere un elemento corporeo, né emanazione di alcun corpo (chè anche in tal caso sarebbe un elemento corporeo), ma effetto dell'esservi il fuoco o cosa simile in contatto del diafano, giacché non è possibile che in uno stesso luogo si trovino simultaneamente due corpi;... » [16].

[16] Cfr. Aristotele, *Dell'Anima*, tradotto da P. Eusebietti, Paravia, Torino 1931.

Non vi è dubbio che Aristotele vuole escludere l'emissione, che sarebbe, secondo lui, contraria al principio della incompenetrabilità dei corpi. Però sul significato da attribuire alle parole da lui scritte a proposito delle sue idee, ci vuole un po' di buona volontà da parte dei commentatori, per arrivare a vedere in quella frase « effetto dell'esservi il fuoco » nel diafano, l'espressione di una *azione presente*, *attuale*, cioè modificazione del mezzo, dovuta alla sorgente di fuoco. Gli interpreti più benevoli, collegano questo passo con qualche altro, vedono in Aristotele addirittura un precursore delle moderne teorie ondulatorie della luce.

Certo coloro che interpretano in questo modo non debbono essere molto lontani dal vero, perché, dopo tutto, dopo aver negato l'emissione dall'occhio, l'emissione dai corpi e l'emissione combinata, non restava che fare appello a un moto o a una alterazione del mezzo.

Purtroppo si direbbe che ad Aristotele manca la parola, per esprimere il suo pensiero, se esso è stato proprio così definito. In altri passi, per tentare di spiegarsi, arriva a dire che la luce è come l'anima del diafano, la sua vitalità, mentre lo stesso diafano nelle tenebre è come morto.

E conferma questo suo pensiero, aggiungendo che se intorno all'occhio vi fosse il vuoto completo, cioè l'assenza di ogni mezzo (*etere* compreso) la visione sarebbe impossibile.

Ma non sembra che le idee di Aristotele, al pari di quelle dei *Dialoghi* di Platone, fossero accettate o assimilate, anche dai contemporanei.

L'esame dei documenti delle epoche successive, dimostra che la miglior fortuna arrise proprio alla teoria della scuola pitagorica ed a quella della scuola atomistica, lasciando senza seguito le idee più complesse di cui era stato ricco il periodo ellenico della storia della scienza.

È interessantissimo il caso di Euclide che fu allievo di Platone e di poco posteriore ad Aristotele [17]. Nella sua *Ottica* e nella *Catottrica* egli si dichiara nettamente a favore della teoria pitagorica della emissione di raggi dall'occhio. Devesi peraltro segnalare l'opinione

[17] È dubbio se sia nato in Sicilia o in Alessandria d'Egitto. È certo che in questa città dirigeva una scuola matematica, verso il 300 a. C.

molto diffusa che questi due libri non siano dello stesso Euclide degli *Elementi*, ma di un altro omonimo, di cui non si hanno altre notizie. In ogni caso questi libri hanno avuto un successo enorme e una vita invidiabile, perché ne risulta curata un'edizione ben sette secoli più tardi da Teone Alessandrino, che vi premise una prefazione.

Appunto da questa possiamo sapere per quali argomenti Euclide credette di attenersi alla teoria della emissione dei raggi dall'occhio. Dopo avere notato che uno può avere davanti a sé un ago e pur cercandolo attentamente non vederlo, aggiunge: « Se l'atto visivo fosse destato dalle immagini emanate — e da tutti i corpi emanerebbero immagini perpetuamente che ecciterebbero il nostro senso — donde avviene che chi cerca l'ago o investiga la pagina di un libro, non vede a un tratto e l'ago e tutte le lettere? Forse perché distratto? No, perché mentre alcuno, attentamente cercando, non immediatamente trova, spesso altri, pur conversando ed essendo distratto, trova più presto. Forse che non tutte le immagini arrivano all'occhio? Ma per qual causa allora non tutte quelle che arrivano, danno impressione? » [18].

L'altro argomento è la forma dell'organo sensibile: tutti gli organi dei sensi hanno forma cava, perché atta a ricevere; l'occhio con la sua forma globulare sporgente, deve essere atto a emettere.

Non si direbbero argomenti potentissimi; ma ciò sta a dimostrare quanto poco bastasse a ribattere le argomentazioni a favore delle ipotesi di Aristotele, di Platone o degli altri.

Sull'*Ottica* di Euclide conviene fermarsi un po', perché a differenza di quanto avveniva per gli altri autori, qui ci troviamo di fronte a un testo che ci permette di ricostruire il modello della luce che il suo autore si era foggiato; e poi perché si tratta di un'opera veramente importante, dal punto di vista storico.

Euclide era un matematico; non diciamo questo per ricordare una qualifica che è arcinota a tutti, ma soltanto perché vogliamo segnalare l'influenza che il ragionamento di tipo matematico ha avuto sullo sviluppo delle teorie della luce.

Egli come tale, cioè come spirito eminentemente deduttivo, ha bisogno di postulati, per *dedurne* l'ottica. Ne mette insieme una dozzina, prendendoli non si sa bene di dove, e li premette all'*Ottica*; altri sette li premette alla *Catottrica*.

[18] Cfr. Ovio, *L'Ottica di Euclide*, Manuale Hoepli, Milano 1918.

Vale la pena di rievocarli per disteso. Ecco quelli dell'*Ottica*:

1° I raggi emessi dall'occhio precedono per via diritta.

2° La figura compresa dai raggi visivi è un cono che ha il vertice all'occhio, e la base al margine dell'oggetto guardato.

3° Si vedono quegli oggetti a cui arrivano i raggi visivi.

4° Non si vedono quegli oggetti ai quali i raggi visivi non arrivano.

5° Gli oggetti che si vedono sotto angoli maggiori, si giudicano maggiori.

6° Gli oggetti che si vedono sotto angoli minori, si giudicano minori.

7° Gli oggetti che si vedono sotto angoli uguali, si giudicano uguali.

8° Gli oggetti che si vedono con raggi più alti, si giudicano più alti.

9° Gli oggetti che si vedono con raggi più bassi, si giudicano più bassi.

10° Gli oggetti che si vedono con raggi diretti a destra, si giudicano a destra.

11° Gli oggetti che si vedono con raggi diretti a sinistra, si giudicano a sinistra.

12° Gli oggetti che si vedono con più angoli, si distinguono più chiaramente.

13° Tutti i raggi hanno la stessa velocità.

14° Non si possono vedere gli oggetti sotto qualsiasi angolo.

Ecco ora i postulati della *Catottrica*:

1° Il raggio è una linea retta di cui i mezzi toccano le estremità.

2° Tutto ciò che si vede, si vede secondo una direzione rettilinea.

3° Se lo specchio sta su di un piano, e su questo sta un'altezza qualsiasi elevata ad angoli retti, la retta interposta tra lo spettatore e lo specchio ha la stessa ragione con la retta interposta tra lo specchio e l'altezza considerata, che l'altezza dello spettatore con l'altezza presa in considerazione [19].

[19] Questo discorso, un po' difficile, è da interpretarsi nel modo seguente: sopra un piano si disponga un *piccolo* specchio S (a contatto e complanare col piano stesso) e un *piccolo* oggetto O, distante di h_1 dal piano e di s_1 dallo

4° Negli specchi piani l'occhio posto sulla perpendicolare condotta dall'oggetto allo specchio, non vede l'oggetto.

5° Negli specchi convessi, l'occhio posto sulla retta condotta dall'oggetto al centro della sfera, di cui lo specchio è una porzione, non vede l'oggetto.

6° Lo stesso accade per gli specchi concavi.

7° Se si pone un oggetto qualunque al fondo di un vaso, e si allontana il vaso dall'occhio, finché l'oggetto non si vede più, l'oggetto torna visibile a quella distanza se si versa dell'acqua nel vaso [20].

Veramente, a parte l'esuberanza dei particolari, che si avvicina più alla prolissità che al giusto rigore matematico, in questo gruppo di premesse, oltre a qualche ipotesi sulla natura e sulle proprietà della luce, vi è più che altro un complesso di risultati sperimentali.

Il primo postulato dell'*Ottica* contiene tre concetti importanti:

1° Il concetto di « raggio », come direzione di propagazione della luce; come filetto elementare di luce.

2° Il concetto che la luce propagantesi lungo questo raggio sia emessa dall'occhio.

3° Il concetto della propagazione rettilinea.

Si comincia dunque a delineare il modello di « luce » che ancor oggi costituisce l'anima dell'ottica geometrica. Se Euclide si fosse limitato al primo e al terzo di questi concetti, avrebbe gettato le basi di una costruzione che nella sua cristallina purezza ha sfidato i secoli. Ma egli invece ha voluto in certo qual modo *completare* la costruzione con dei concetti di natura fisica e fisiologica, che non hanno avuto certo molta resistenza di fronte al tempo e al progredire degli studi.

Il secondo postulato contiene un completamento interessante del primo. Esso costituisce il fondamento della « prospettiva ». Tuttavia è da segnalarsi che Euclide pone il *vertice del cono nell'oc-*

specchio. L'occhio A dell'osservatore si trovi ad un'altezza h_2 dal piano e a una distanza s_2 dallo specchio. Il postulato afferma che quando l'occhio A vede l'immagine dell'oggetto O è soddisfatta la relazione

$$s_2 : s_1 = h_2 \quad h_1$$

il che, geometricamente equivale a dire che l'angolo di riflessione deve essere uguale a quello di incidenza. L'autore per altro tralascia di specificare che i due angoli debbono essere anche complanari.

[20] Cfr. Ovio, *op. cit.*, p. 21 e p. 233.

chio[21] il che nelle mani di un geometra della finezza di Euclide è sintomatico. Intanto, non si sa perché abbia parlato di *cono,* quando la base poteva avere una forma qualunque; ma soprattutto il fatto di averne posto il vertice nell'occhio e basta, vuol dire che per lui quest'occhio era un'entità assimilabile a un punto. Non si veda in questa critica una pedanteria da parte nostra; su questi argomenti si svolsero le discussioni degli studiosi successivi e non senza profitto per l'evoluzione delle idee.

I postulati 3° e 4° hanno un contenuto fisico-fisiologico: è necessario e sufficiente, perché si veda un oggetto, che ad esso arrivino i raggi visivi.

I postulati dal 5° all'11° sono invece di natura fisio-psicologica, perché riguardano il collegamento tra gli elementi geometrici e spaziali (angoli e direzioni) e il *giudizio* delle dimensioni e della posizione degli oggetti stessi nello spazio.

Il contenuto del postulato 12° è fisiologico: oggi si direbbe che contiene l'idea del potere risolutivo dell'occhio, ossia della sua acuità visiva.

I postulati 13° e 14° si trovano soltanto, e tra parentesi, nel testo greco dell'*Ottica* riportato dall'Heiberg. Il primo di essi riguarda la velocità dei raggi, che evidentemente deve intendersi come velocità di propagazione della luce; ed effettivamente non ha quasi seguito nel resto dell'opera. Mentre il secondo verrà poi applicato nelle dimostrazioni in una forma un po' più ristretta, che cioè non sono visibili oggetti di grandezza angolare inferiore a un certo limite.

Quale concetto Euclide si fosse fatto della luce, viene chiarito nella prefazione attribuita a Teone, come si è accennato poco sopra. Vale la pena di esaminare le considerazioni contenutevi.

Secondo Teone, Euclide sarebbe stato portato a postulare il percorso della luce per raggi rettilinei dalla considerazione delle ombre e della luce penetrante attraverso le finestre e le fessure. Vede in questa propagazione rettilinea la causa delle ombre gettate dai corpi quando vengono illuminati con le sorgenti di luce e naturalmente studia le dimensioni delle ombre stesse in relazione alle dimensioni della sorgente, del corpo opaco e delle distanze reciproche. Si parla perfino di una esperienza: due tavolette in ciascuna delle quali viene fatta una sottile fessura con una piccola

[21] « τὴν κορυφὴν μεν ἔχοντα ἐντῷ ὄμματι ».

sega, poste di seguito, davanti ad una piccola fiamma dimostrano che la luce di questa, attraversata la prima fessura, oltrepassa la seconda quando entrambe queste sono allineate con la fiamma.

Queste considerazioni e queste esperienze vivono tuttora nei trattati elementari di ottica; anche se l'esperienza ha dimostrato, da oltre tre secoli, che le cose non vanno proprio intese così semplicemente.

Nel seguito della prefazione di Teone, si passa poi a sostenere che i raggi luminosi debbono essere un po' discosti uno dall'altro. Questa strana idea viene giustificata con ragionamenti di questo tipo: un oggetto non può vedersi di colpo in tutta la sua estensione; a volte, cercando un piccolo oggetto per terra, come un ago, non lo si vede, nonostante che non sia occultato da nessun ostacolo; quando si è portato lo sguardo nel punto dove effettivamente si trova, allora lo si vede senza difficoltà. Analogamente non si vedono tutte insieme le lettere di una pagina scritta. L'autore ne deduce che ci debbono essere delle lacune transitorie nel nostro campo visivo; e spiega che un oggetto guardato appare senza lacune perché i raggi lo esplorano tutto con meravigliosa celerità.

Sono poi considerate anche alcune apparenze o illusioni visive.

Dopo questi chiarimenti di Teone, si intuisce l'intento di Euclide quando ha enunciato i postulati 3° e 4° dell'*Ottica*, che a prima vista possono apparire quasi superflui; sono invece necessari quando si neghi la continuità della distribuzione dei raggi nel cono luminoso.

Nonostante tutto il rigore logico, che ha reso immortale Euclide, bisogna riconoscere che non è riuscito a riunire in queste premesse tutte le proprietà che egli intendeva attribuire alla luce; perché dalla lettura del testo ne affiorano delle altre, che egli ha ammesso tacitamente. Per esempio, nella 23ª Proposizione della *Catottrica*, parla di raggi più lunghi e più corti e della conseguente percezione dei punti visivi più lontani o più vicini; come se l'occhio sentisse la lunghezza dei raggi che egli emette.

Ma il caso più notevole è quello della posizione difficile in cui vengono a trovarsi i postulati della *Catottrica* rispetto a quelli dell'*Ottica*. Infatti venendo a parlare della riflessione, l'autore dimentica tranquillamente che il primo postulato dell'*Ottica* obbligava i raggi emessi dall'occhio a procedere in linea retta, e non dà nessuna delucidazione del perché un'eccezione deve esser fatta quando essi arrivano sopra uno specchio; perché questa riserva

non l'ha espressa quando ha enunciato il primo postulato dell'*Ottica*?

Inoltre l'enunciato del primo postulato della *Catottrica*: « il raggio è una linea retta di cui i mezzi toccano le estremità » richiede di essere interpretato nel senso che la retta può essere anche spezzata, altrimenti non si concilia affatto col fenomeno della riflessione a cui proprio si riferisce il postulato.

Invece dove Euclide ha un tocco geniale è a proposito del secondo postulato della *Catottrica*: « Tutto ciò che si vede, si vede secondo una direzione rettilinea ».

Si direbbe che egli abbia intuito la scissione fra raggio di luce e raggio visuale; che abbia visto il diverso comportamento per cui il primo si piega sullo specchio, mentre la visuale non si piega mai. E questo secondo concetto lo ha espresso nettamente nel 2° postulato; mentre non ha avuto o la capacità o il coraggio di esprimere il primo, perché, per lui che ammetteva l'uscita della luce dall'occhio, era addirittura acrobatica questa scissione fra il raggio di luce e la visuale; i quali dovevano essere uniti finché, incontrando uno specchio uno doveva deviare e l'altro no!

E allora Euclide ha adottato un metodo che non è proprio della sola antichità: c'è passato sopra in silenzio.

Il 3° postulato della *Catottrica* racchiude la legge della riflessione sopra una superficie piana; la quale poi viene applicata anche alle superficie sferiche, concave e convesse.

I postulati 4°, 5° e 6° sono strani: ribattono successivamente per gli specchi piani, per quelli concavi e per quelli convessi lo stesso concetto: che l'occhio posto sulla perpendicolare da un oggetto allo specchio, non vede l'oggetto.

Il 7° postulato è un'esperienza di rifrazione.

I due interessantissimi libri che Euclide ha costruito su queste basi, sono fondamentalmente due libri di geometria. Non a torto il primo di essi ha ricevuto anche il titolo di *Perspectiva*[22]. Questo è il contenuto di maggior valore che bisogna andare a cercare e a mettere a nudo, scrostandolo di tutto il complesso di concetti, di nozioni, di circostanze assai scollegate e disordinate e non sempre coerenti, di natura diversa, cioè di natura fisica, fisiologica e psicologica.

Non vi è dubbio che questo libro è il frutto di uno studio spe-

[22] Cfr. la traduzione fattane da P. Egnatio Danti, Giunti, Firenze 1573.

rimentale condotto con acume più che con metodo. L'ottica nascente, appena sbozzata, vi appare con tutta la sua complessità e mette a dura prova la sapienza d'indagine dell'uomo. E questi, per iniziare l'opera di penetrazione e di conquista, si crea un'arma di una potenza formidabile: si crea il modello del *raggio*, astrazione matematica necessaria alla mente umana perché possa orizzontarsi e avanzare in un terreno che sembrava impraticabile.

Con questa « luce » semplice, ideale, obbediente a leggi impossibili, l'uomo si è creato il mezzo per ragionare e per indagare, anche nel campo sperimentale.

Questo modello, questa creazione, superata, ma viva, dopo millenni, è il vero contenuto di valori dell'opera di Euclide.

Egli l'ha creato, questo modello, e per quanto l'abbia fatto funzionare mirabilmente sia nell'*Ottica* come elemento proiettante, sia nella *Catottrica* per lo studio della riflessione, lo ha lasciato incrostato di appendici che hanno la pretesa di dargli un carattere fisico. E qui, seppure dobbiamo riconoscere molta abilità e molto acume nell'autore, non si può dire che abbia raggiunto delle conclusioni o delle inquadrature degne di nota. Ci troviamo di fronte a un cumulo di osservazioni ancora scollegate e inconcludenti.

Alcuni punti meritano di essere messi in evidenza. Euclide insiste nel ritenere la luce emessa dall'occhio; per altro ne postula la rettilinearità su osservazioni e su esperienze fatte con sorgenti esteriori, almeno in base alla Prefazione di Teone. Sarebbe interessante poter stabilire come egli conciliasse i due tipi di luce; riteneva forse che quella emessa dall'occhio e che andava a vedere gli oggetti fosse della stessa natura di quella del Sole, la quale entrava in una stanza attraverso una finestra? Non crediamo che sia facile rispondere a questa domanda. Eppure l'ultima Proposizione della *Catottrica*, la 31ª, dice testualmente così: « Con gli specchi concavi opposti al Sole si può riuscire ad accendere il fuoco ». E nella dimostrazione si parla di raggi emessi dal Sole, che si riflettono sullo specchio, come in tutte le dimostrazioni precedenti si parla di raggi emessi dall'occhio, che si riflettono sulle superficie fino a raggiungere i vari oggetti.

D'altra parte questo concetto era così radicato nella mente di Euclide, che lo ha trascinato ad affermare come vere delle conseguenze praticamente assurde e facilmente verificabili come tali. Per esempio, la Proposizione 24ª contiene il seguente teorema: « Se l'occhio è collocato al centro di uno specchio concavo, esso vede

soltanto sè stesso ». Non poteva essere altrimenti se i raggi partenti dall'occhio fossero andati a vedere l'oggetto a cui arrivavano; perché tutti, dopo la riflessione, dovevano ricadere sull'occhio stesso. Eppure questa conclusione non solo poteva essere dimostrata assurda sperimentalmente coi mezzi di cui Euclide appare dotato, in base alle altre osservazioni citate, ma le sue stesse pagine contengono degli elementi sufficienti a dimostrargliene l'assurdità. Infatti nella 3ª Proposizione dell'*Ottica* è scritto: « ... è necessario che tra occhio e oggetto un certo intervallo sempre ci sia, altrimenti l'oggetto non si vede » (dunque già comincia a delinearsi il Punto prossimo!); e anche una applicazione rigorosa del 2° postulato della *Catottrica* doveva portare a delle conclusioni più giuste.

La complessità dell'argomento giustifica largamente queste deficienze. Una mente umana, anche sublime come quella di Euclide, non poteva concretare i risultati che, poi, sono stati il frutto del lavoro di una folla di persone, in centinaia e centinaia di anni!

In conclusione a Euclide spetta il merito di aver creato il modello geometrico della luce, il *raggio* rettilineo e privo di struttura fisica, il quale ha servito alla costruzione dell'« ottica geometrica », della stessa ottica geometrica di oggi. Inoltre nella sua opera si trovano i fondamenti della prospettiva, le leggi della riflessione e delle immagini negli specchi piani e in quelli sferici. Vi si trovano pure, per quanto disordinate, scollegate e qualche volta anche male interpretate, numerose osservazioni di ottica fisica, fisiologica e psicologica.

Crediamo che tutto questo sia sufficiente per collocare il nome di Euclide fra quelli dei più grandi cultori dell'ottica.

Certamente Euclide ha avuto un'influenza notevole sullo sviluppo dell'ottica; se ancora dopo sette secoli si curava un'edizione delle sue opere e non a scopo storico, ma tuttora di studio.

Del resto troviamo nella sua scia dei nomi illustri come quello di Ipparco [23], il quale, se Plutarco non ha deformato le sue idee, era d'avviso che i raggi emessi dai due occhi della stessa persona dovevano andare a toccare gli oggetti come due mani alle estre-

[23] Di lui si sa che nacque a Nicea in Bitinia e che fece osservazioni di astronomia a Rodi fra il 161 e il 126 a. C.

mità delle braccia e riportarne gli elementi necessari per la visione degli oggetti stessi.

Anche il grande Claudio Tolomeo [24] (che peraltro sostituisce una *piramide* al *cono* prospettico di Euclide col vertice nell'occhio) concepisce i raggi luminosi come emessi dall'occhio stesso, il quale ne sente la direzione e la lunghezza. Egli riconosce ai raggi mediani della piramide prospettica una capacità visiva più spinta; studia la visione binoculare e lo sdoppiamento delle immagini quando non si combina opportunamente la piramide dell'occhio destro con quella dell'occhio sinistro. Considera i colori come uno strato superficiale dei corpi; studia la questione del giudizio della grandezza degli oggetti osservati, combinando la lunghezza della piramide prospettica con la grandezza della sua base.

Egli pure ci ha lasciato un testo di *Ottica*, in cui fra l'altro è degno di nota lo studio accurato delle immagini che si osservano negli specchi concavi e convessi (studio molto progredito rispetto a quello contenuto nella *Catottrica* di Euclide) e anche sono degni di nota i risultati delle sue misure intese a stabilire una legge del fenomeno della rifrazione, legge che formulò in forma risultata poi inesatta; ma dal punto di vista delle idee sulla natura della luce non troviamo in Tolomeo dei passi molto interessanti. È degno di nota il perfezionamento dell'indagine sperimentale, l'aumento di cognizioni di natura sperimentale circa le proprietà della luce; ma nel complesso vi troviamo ancora il miscuglio caotico delle idee geometriche con quelle di natura fisica, o fisiologica o psicologica, senza inquadrature o sintesi degne di nota.

Un'osservazione importante si trova invece in un terzo testo di ottica, tramandatoci dall'antichità, cioè in quello di Damiano-Eliodoro da Larissa, la cui epoca non è nota, ma è certamente successiva a quella di Tolomeo.

Anche quest'autore insiste sulla rettilinearità dei raggi visuali e sulla struttura conica della visione prospettica. Però comincia a sentire che non soltanto l'occhio, ma anche la pupilla è troppo estesa per funzionare da vertice del cono e, non si sa bene per quali ragioni, pone questo vertice internamente all'occhio, come al centro di

[24] Nacque in Alessandria d'Egitto in epoca non precisata; si sa che eseguì le sue osservazioni astronomiche tra il 127 e il 151 d. C.

una sfera di cui la pupilla rappresenti la quarta parte. Questo primo passo entro la cerchia delle tuniche del globo oculare avrà un seguito interessante, come vedremo nei prossimi Capitoli.

Pure interessante è il confronto che Eliodoro fa fra i raggi che egli ancora fa uscire dall'occhio, e quelli del Sole, argomento, sul quale Euclide e gli altri ottici della sua scuola non consta che si siano soffermati, come si è già notato. Eliodoro dimostra che entrambe hanno le stesse proprietà sperimentali.

Più profonda è la critica che Eliodoro fa alla ipotesi della emissione dei raggi. Egli, come si è detto, suppone che siano emessi dall'occhio, ma aggiunge che la vera ipotesi consiste nell'ammettere la forma rettilinea dei raggi e nell'ammettere la legge della riflessione perché sono questi gli elementi che permettono di studiare le immagini.

Egli precisa poi che la visione viene fatta direttamente, per riflessione, per rifrazione; precisa pure che il cammino rettilineo è conseguenza necessaria del fatto che richiede il minor tempo; « perché se la vista debbe andare quanto più presto sia possibile alla cosa da vedersi, è necessario che vadia per linea retta, essendo, che questa è la minore di tutte le linee che hanno i medesimi termini;... »[25]. Riporta inoltre le conclusioni del « Mecanico Herone », circa il cammino minimo seguito dai raggi anche nella rifrazione: « Essendo che ha dimostrato il Mecanico Herone, nel libro degli specchi, che quelle rettilinee, che ad angoli uguali si rompono, sono minori di tutte le altre, che dalle medesime simili parti vengono, e si rompono alle parti medesime ad angoli ineguali. Il che havendo dimostrato disse: *Se la natura non ha in darno operato intorno al veder nostro*, il rompimento del vedere si fa con angoli pari. Et questo si vede chiaro, poiché i raggi del Sole si rompono ad angoli pari... »[26]. L'aver esteso così leggermente alla rifrazione la legge del minimo cammino ha tolto a Erone il merito di aver trovato quello che oggi si chiama il *principio di Fermat*.

A parte l'opinione di vari storici che ritengono avere Eliodoro copiato tutto da Erone Alessandrino, fiorito in epoca non ben nota, ma certo nel I o nel II secolo dell'Era volgare, si deve ricono-

[25] Cfr. *La prospettiva* di Eliodoro Larisseo, tradotta da P. Egnatio Danti, Giunti, Firenze 1573. Si trova in fondo allo stesso volume già citato della *Prospettiva* di Euclide, tradotta dallo stesso Danti.

[26] Cfr. nota precedente.

scere in questo complesso di osservazioni una rimarchevole maturità di concetto. Soprattutto per questo: l'ottica geometrica, nata con Euclide, ma rimasta invischiata e frammista a tutte le altre ottiche ancora informi e indefinite, se ne libera finalmente.

La fase a cui siamo giunti nello sviluppo delle idee sulla natura della luce, si riassume nel modo seguente: essendo stato raccolto un gruppo già considerevole di elementi di natura matematica (geometrica), fisica, fisiologica e psicologica, il primo gruppo, più astratto e più maturo degli altri, assume una fisionomia particolare che si impone. Lasciando in sospeso le considerazioni e le ipotesi di natura fisica, fisiologica e psicologica, la luce viene considerata nei soli suoi elementi geometrici, sintetizzati per intanto nella struttura rettilinea del raggio visuale, nella legge della riflessione, nella troncatura per rifrazione, nel complesso dei fenomeni di prospettiva.

Questa è *un'ottica* che può stare in piedi da sé e può progredire su queste sole ipotesi basilari. Essa è appunto l'*ottica geometrica*, che vive e prospera ancor oggi, dopo quasi due millenni da quando Erone e Eliodoro l'hanno liberata dalle sovrastrutture eterogenee e impacciose.

Siamo giunti così al III secolo dell'Era volgare e le teorie ancorate all'emissione dei raggi dall'occhio sono ancora vive, e soltanto ora, dopo circa sette secoli di vita, si comincia a riconoscere che, dopo tutto, in quello che era stato concluso fino ad allora di sostanziale e accertato c'era soltanto il contenuto geometrico e che questo era lo stesso sia che la luce fosse emessa dall'occhio, sia che vi giungesse dall'esterno. Cioè, queste due ipotesi non ricevevano nessuna conferma o negazione dal complesso degli studi geometrici.

Ciò non può non apparire strano, quando si pensi che contemporaneamente si erano sviluppati anche gli studi nell'indirizzo segnato dalla scuola atomistica, di cui abbiamo riportato il pensiero, secondo la formula attribuita a Leucippo.

Un concetto affine, ma già più definito, si trova espresso in una lettera di Epicuro[27] a Erodoto, riprodotta nel Libro X di Diogene

[27] Epicuro da Samo visse fra il 342 e il 270 a. C.

Laerzio. Riportiamo l'interpretazione di questo passo, assai controverso, data dal Trouessart [28] in base alle edizioni di Schneider e di Hubner:

Da tutti i corpi esistenti vengono emesse con continuità certi tipi o forme, di aspetto simile a questi corpi solidi, ma molto più tenui di tutte le cose sensibili... Questi tipi sono ciò che noi chiamiamo èidola (εἴδολα) ossia immagini. Il loro moto, che avviene nel vuoto, non incontrando nessuna resistenza, ha una tale velocità che percorre qualunque distanza immaginabile in un tempo inapprezzabile... Bisogna ancora notare che queste immagini si formano nel tempo stesso in cui nasce il pensiero. Perché data la continuità della emissione da parte delle superficie dei corpi, ne escono anche immagini che non sono sentite. Queste emissioni conservano per molto tempo la posizione relativa e l'ordine degli atomi; per quanto qualche volta possa avvenire delia confusione.

D'altra parte questi complessi si formano senza ritardo nell'aria, perché sono forme senza corpo...

In tutto questo non vi è niente di contraddittorio col funzionamento dei sensi, se si tien conto del modo in cui questi sensi debbono essere stimolati perché ci diano le impressioni che ci sono *simpatiche*, degli oggetti esterni. Infatti bisogna ammettere che noi vediamo le forme degli oggetti esterni e che noi pensiamo, in conseguenza di qualche cosa di questi oggetti che è penetrato in noi. Perché le cose dell'esterno non ci rivelerebbero la loro natura propria, come per esempio il loro colore, per mezzo dell'aria interposta tra loro e noi, o per mezzo di raggi o per ogni altra emissione simile che andasse da noi a questi oggetti, nello stesso modo come ciò può farsi per mezzo di figure mandate a noi dalle cose stesse: figure che, conservando la similitudine agli oggetti per colore e per forma, penetrano nella vista e nel pensiero secondo la proporzione della loro grandezza e con un movimento rapidissimo. L'immagine (φαντασία) che così noi abbiamo ricevuto per impressione nello spirito o nei sensi, della forma e dei caratteri, è proprio la forma del solido (dell'oggetto reale)...

L'inganno e l'errore è nell'opinione, che si aggiunge in seguito ad un'azione che avviene entro di noi e che si unisce alle nozioni fornite dalla vista. Bisogna dunque frenare l'opinione, e impedire che il suo intervento guasti tutto.

Lo stesso avviene per l'udito, che ha luogo quando una emissione viene dal corpo che emette una parola, un suono, un fischio, o qualunque altra cosa capace di dare l'impressione sonora... Bisogna dire ancora la stessa cosa per l'odorato: cioè che non si può produrre nessuna impres-

[28] Trouessart, *op. cit.*, p. 170.

sione di questo tipo, se non per mezzo di certi corpuscoli che sono introdotti dalla cosa sentita stessa, e che hanno una certa grandezza convenientemente proporzionata per stimolare questo senso. Così fra questi corpuscoli alcuni producono la loro impressione in modo confuso e antipatico; altri in modo tranquillo e simpatico.

Per quanto con meno seguito della teoria pitagorica, pure anche questa idea della emissione di simulacri, di scorze, di immagini dai corpi ebbe una vita lunga dal momento che fu professata fermamente dalla scuola epicurea. Una documentazione particolarmente importante è costituita dal famoso poema *De rerum natura* (*Della natura delle cose*) di Tito Lucrezio Caro[29], che fu appunto un epicureo convinto. Nella prima parte del IV dei VI Libri che costituiscono questo poema sono trattate varie questioni di ottica soprattutto la teoria della visione. Egli così si esprime:

Dico che dalla superficie di tutti i corpi emanano delle *effigie* o delle *figure* libere, a cui si addice il nome di *membrane* o *scorze*, perché hanno il medesimo aspetto e la medesima forma dei corpi da cui si distaccano per diffondersi nell'aria.

L'intelletto meno acuto può convincersi della loro esistenza, perché c'è un gran numero di corpi le cui emanazioni sono ben visibili. Da una parte ci sono delle *particelle staccate, che si spandono in tutte le direzioni*, come il fumo che esce dal legno, e il calore (il vapore) che si sprigiona dal fuoco. Dall'altra ci sono dei tessuti contesti e continui, come la spoglia che la cicala depone d'estate, la membrana di cui si libera il vitello nascente, e la buccia del serpente che spesso vediamo sopra i cespugli. Questi esempi vi dimostrano che la superficie di tutti i corpi deve mandare di tali *immagini* per quanto più sottili; infatti è impossibile spiegare perché queste effigie grosse dovrebbero verificarsi piuttosto di quelle altre, la cui finezza ci sfugge; specialmente essendo la superficie di tutti i corpi rivestita di una moltitudine di corpuscoli impercettibili, che possono staccarsi senza perdere il loro ordine e la loro forma ini-

[29] Di Tito Lucrezio Caro non si conosce sicuramente l'origine; forse è nato a Roma, dove certamente è vissuto ed è morto. La data della sua nascita si può porre fra il 99 e 95 a. C. e quella della sua morte tra il 55 e il 51 a. C. Il *De rerum natura* è la sua unica opera di cui si abbia notizia, ed anche essa è rimasta incompiuta per l'improvvisa morte dell'A. Nei tempi moderni ne sono state fatte molte edizioni e traduzioni, specialmente nel Rinascimento. Tra le più recenti sono particolarmente notevoli quelle curate da H. Diels (Berlino 1923), A. Ernout (Parigi 1925), C. Bailey (Oxford 1898, 1923). Nel seguito del testo, per le citazioni ci riferiamo a quest'ultima.

ziale, e slanciarsi con velocità tanto più grande in quanto hanno meno ostacoli da superare, essendo sciolti e posti alla superficie [30].

Egli cita quindi un caso evidente: quando in teatro i panneggiamenti colorati in colori vivi colorano del loro tono le persone e le cose circostanti. Se dunque questo « colore » si stacca dai panni per andare sugli oggetti che sono intorno, perché questo fenomeno non si deve ammettere in generale? E conclude: « Noi abbiamo scoperto così la traccia di questi *simulacri*, che volano per aria con dei contorni così liberi, che, presi isolatamente, sfuggono all'occhio [31] ».

Egli confronta quindi la luce con l'odore, il calore, il fumo e le altre emanazioni dello stesso tipo, e trova che mentre la prima, a causa della sua estrema delicatezza, non ha ostacoli, le altre vengono diffuse e disperse, perché non possono trovare « delle condutture in linea retta ».

Trova infine che i simulacri visti nell'acqua, negli specchi, e in tutti i corpi lucidi, essendo perfettamente simili agli oggetti veri, non possono essere formati che dalle loro immagini, emesse come è detto prima. « Tutti i corpi dunque inviano delle immagini simili, che non sono visibili separatamente, ma che riflesse e riunite per mezzo degli specchi colpiscono infine i nostri organi ».

Più tardi si intrattiene a considerare la estrema velocità con cui queste immagini si propagano nello spazio. Gli argomenti e le *esperienze* in proposito ci sembrano un po' ingenue, ma non hanno proprio altra pretesa che di dare un'indicazione intuitiva. E infine una specie di perorazione completa il quadro delle idee:

Così, lo ripeto, siete obbligati a riconoscere questa emanazione di simulacri, che colpiscono gli occhi e producono in noi la sensazione della vista. Infatti gli odori non sono che l'emissione continua di certi corpi; il freddo emana dai fluidi, il calore emana dal sole, dal mare esala il sale che corrode gli edifici costruiti sulla riva; mille suoni di tutte le specie percorrono incessantemente l'aria; quando passeggiamo sulla spiaggia dell'oceano il nostro palato sente un sapore salino; mai assistiamo alla preparazione dell'assenzio senza sentirne il gusto amaro; tanto è vero che tutti i corpi mandano continuamente delle emanazioni di tutte le specie

[30] Lucrezio, *De rerum natura*, curata da C. Bailey, Oxford 1923, Libro IV, vv. 46-70.

[31] Ivi, vv. 87-89.

che si spandono da ogni parte, senza mai fermarsi o smarrirsi, perché in ogni momento noi abbiamo delle sensazioni, perché ci è sempre possibile di vedere, di sentire odori, di udire... [32].

Se ci interessasse conoscere più a fondo le ragioni per le quali i sostenitori della teoria dei simulacri si dimostravano convinti della esistenza di queste entità così strane, varrebbe la pena di analizzare più estesamente il testo di Lucrezio, testo che, anche nella sua concisione, fornisce molti elementi in proposito. Ad esempio, non può non riuscire interessante l'idea che la formazione di questi simulacri fosse legata ad una struttura atomica della materia, straordinariamente fine. Tutte le cose erano, per Lucrezio, composte di elementi piccolissimi, che egli chiama *primordia*, o anche *exordia rerum*. Di questi elementi, uscenti dall'interno dei singoli corpi, si dovevano considerare composte le esalazioni informi delle sostanze, per esempio di quelle odorose, di cui ha portato alcuni esempi anche nei brani sopra citati. Egli precisa che queste esalazioni sono informi perché escono dall'interno dei corpi, e quindi, per uscire attraverso i pori materiali, perdono l'ordine naturale; ma quando invece si distaccano dalla superficie, non vengono disturbate da alcun passaggio obbligato, quindi debbono conservare l'ordine della superficie da cui si distaccano: ecco dunque formati i simulacri. Però egli non tocca il tasto doloroso della contrazione di questi per via, in modo da penetrare in una pupilla di occhio umano ovunque la incontrassero.

Notevole, invece, è un'idea, che, almeno per quanto mi consta, si trova esposta soltanto in questo libro. Uno dei problemi più difficili da risolvere era quello delle informazioni che un simulacro, penetrato in un occhio, portava per indicare la distanza dell'occhio stesso dal corpo emittente; informazione necessaria perché la psiche, nel costruire la rappresentazione del corpo stesso, le potesse dare le dimensioni e la localizzazione giusta nel mondo apparente.

Lucrezio ha il coraggio di affrontare questo problema; egli così scrive: « E quanto una qualsiasi cosa disti da noi, il simulacro permette di vederlo e di valutarlo; infatti quando il simulacro è emesso immediatamente spinge e muove l'aria interposta tra lui e gli occhi e così l'aria scorre sulle nostre pupille e quasi le tocca

[32] Ivi, vv. 216-229.

nel passarvi sopra. Così è possibile che ci rendiamo conto di quanto una qualsiasi cosa sia distante: quanto maggior quantità d'aria è spostata e quanto più lungo soffio tocca i nostri occhi, tanto più lontane da noi vediamo esser le cose; s'intende tutto ciò avviene con tale rapidità che vediamo quale forma abbia un oggetto e quanto disti da noi » [33].

Lucrezio è così convinto di questo meccanismo, che lo applica anche alla riflessione sopra gli specchi. Il fatto che noi vediamo, dietro uno specchio, l'immagine di un oggetto alla stessa distanza a cui l'oggetto si trova davanti, egli lo spiega col fatto che il vento di cui ha parlato nel brano sopra riportato, si riflette lui pure sullo specchio e quindi determina la distanza dell'immagine dall'occhio.

Evidentemente questa spiegazione non ha incontrato l'approvazione dei fautori della teoria dei simulacri, ed è stata dimenticata: nessuno ne ha più parlato. Però è una documentazione dello sforzo che i filosofi del tempo facevano per spiegare i particolari dei fenomeni ottici.

Più interessanti sono gli accenni che Lucrezio fa alla grande velocità dei simulacri; ma per venire alla questione che più riguarda la nostra storia, devesi rilevare che la nomenclatura usata da Lucrezio è molto varia e indefinita. Per ciò che riguarda i simulacri, si incontrano termini come *effigiae*, *figurae*, *imagines*, *membranae*, *cortex*, varietà questa non sempre giustificabile dalle necessità metriche, dato che il testo è in versi. Questa varietà filologica è un indice infallibile della indefinizione delle idee.

Più interessante è l'accenno implicito a un agente necessario per provocare la emissione dei simulacri da parte dei corpi; perché evidentemente questi, al buio, non emettono nulla che li faccia vedere. Lucrezio non affronta il problema decisamente, ma si intravede nel suo scritto l'intenzione di considerare come tale agente un quid emesso dal sole. Ma anche a questo proposito la varietà dei termini costituisce il potente indice filologico della indefinizione delle idee. Lucrezio parla di *lux*, *lumen*, *fulgor*, *splendor* e *clarus candor*. In linea di massima (perché l'impiego di questi termini non è molto preciso e coerente, e in questo possono anche aver influito le necessità metriche) con *lux* Lucrezio indica la con-

[33] Ivi, vv. 244-255.

dizione chiara dell'ambiente, per quanto qualche volta parli anche di *solis lux et vapor*: *fulgor* e *splendor* stanno per chiarore; più preciso invece è il concetto di *lumen* come proprio di un quid emesso dal sole, per riempirne lo spazio. Così si legge: « ... in poco tempo il sole deve inviare molti *lumina* affinché tutto ne sia pieno in ogni momento... » [34]. Analogamente, in altro luogo, dove Lucrezio vuol giustificare la grande velocità di propagazione dei simulacri, si legge: « Di questo tipo sono la *lux* e il *vapor*, perché sono costituiti da minutissimi atomi che sono come pressati e non esitano a superare gli spazi aerei spinti dall'urto degli atomi seguenti. Infatti del *lumen* è seguito da altro *lumine* immediatamente e senza interruzione il *fulgur* è rifornito dal *fulgure* » [35].

Anche in un passo successivo, dove Lucrezio parla delle ombre proiettate dal sole sul suolo, le considera come zone private di *lumine* [36]. Per quanto, dunque, l'idea non sia espressa esplicitamente, è indiscutibile che in queste pagine già si comincia a delineare un *lumen* emesso dal sole e costituito di corpuscoli minutissimi che si lanciano nello spazio e lo riempiono tutto a grandissima velocità. È un'idea allo stato di embrione; ma, come vedremo avrà in seguito sviluppi importanti.

In questo ordine di idee, è molto notevole un altro brano: « Inoltre gli occhi rifuggono da oggetti sfolgoranti ed evitano di guardarli. Anche il sole potrebbe accecarti se tu continuassi a guardarlo insistentemente perché grande è la sua forza e i suoi simulacri, vibrati dall'alto, feriscono gli occhi turbandone i tessuti. Ma qualsiasi *splendor* intenso brucia gli occhi per il fatto che possiede molti semi di fuoco che, penetrando negli occhi, vi producono dolore » [37].

[34] « ... multa brevi spatio summettere debet / lumina sol ut perpetuo sint omnia plena,... », ivi, vv. 161-162. Nella traduzione è stata conservata la parola *lumina*, appunto per indicare che non si sa bene quale significato attribuirgli, e qualunque parola moderna rappresenterebbe una interpretazione che non sicuramente corrisponderebbe all'intenzione dell'A.

[35] « In quo iam genere est solis lux et vapor eius / propterea quia sunt e primis facta minutis / quae quasi cuduntur perque aeris intervallum / non dubitant transire sequenti concita plaga. / Suppeditatur enim confestim lumine lumine / et quasi protelo stimulatur fulgere fulgor », ivi, vv. 185-190.

[36] Ivi, vv. 364-374.

[37] « Splendida porro oculi fugitant vitantque tueri / Sol etiam caecat, contra si tendere pergas, / propterea quia vis magnast ipsius et alte / aera per purum graviter simulacra feruntur / et feriunt oculos turbantia compositura. / Praeterea splendor quicumque est acer adurit / saepe oculos ideo quod semina possidet ignis / multa, dolores oculis quae gignunt insinuando », ivi, vv. 324-331.

È questo un brano molto importante, perché fu ripreso e valorizzato un millennio più tardi, come vedremo fra breve. Si potrebbe rilevare che qui Lucrezio parla di simulacri del sole, tanto intensi da bruciare gli occhi, mentre altrove parlava del *lumen* emesso dal sole, e si guarda bene dal conciliare le due concezioni; ma più interessante invece è la considerazione che mentre osservazioni di questo tipo venivano fatte e perfino scritte in un poema i filosofi della scuola pitagorica le ignoravano completamente e continuavano imperturbabili a parlare di raggi visuali, i quali, uscendo dagli occhi, non potevano certamente esser la causa del bruciore. E ciò per più di un millennio. È questa una dimostrazione dell'enorme prestigio delle idee schematiche, di cui è così ricca la matematica. Abbiamo citato questi brani di Lucrezio, per dimostrare che esisteva una corrente estremista, che non ammetteva compromessi di sorta: la visione avveniva per mezzo di queste emanazioni dei corpi a loro somiglianza, dirette verso l'occhio.

Però questi estremisti non dovevano avere molto seguito. Anche ai loro tempi dovevano apparire come dei fanatici; perché i loro ragionamenti erano troppo sommarii e troppo ristretti e offrivano il fianco a troppe e facili critiche. Del resto non tutti i seguaci di queste idee erano così tassativi come appare Lucrezio; anche Epicuro, ad esempio, faceva delle riserve di una gravità eccezionale. Egli ammetteva che l'« opinione » potesse trarre in inganno e che bisognasse « frenarla » per impedire che il suo intervento alterasse i risultati della visione. Dunque le immagini venivano dai corpi, ne portavano le forme e i colori, ma poi la visione poteva avvenire in un'altra maniera!

Per dimostrare appunto come regnasse una notevole perplessità in proposito al principio dell'Era volgare, riportiamo una critica che si trova in Macrobio [38]. Nel dialogo tra Disario ed Eustato, il primo cita la teoria della emissione delle immagini o simulacri, attribuendone a Democrito e a Epicuro la paternità. Ecco la parte principale del dialogo:

DISARIO: ... Epicuro pensa dunque che si stacchino continuamente da tutti i corpi certi simulacri, che, pur essendo impossibile attribuire alla loro traiettoria il minimo intervallo di tempo, questi simulacri, che sono una figura vuota, trasportano le spoglie coerenti dei corpi, hanno

[38] Macrobio, *Saturnales*, Libro VII, Cap. XIV.

il loro ricettacolo nei nostri occhi e arrivano così alla sede del senso proprio che loro è stato assegnato dalla natura. Ecco che cosa pretende questo filosofo: se tu hai qualche cosa da obbiettare, sono pronto ad ascoltarti.

EUSTATO allora, *mettendosi a ridere*: È facile vedere — disse — che cosa ha indotto Epicuro in errore. Egli si è allontanato dal vero, seguendo l'analogia degli altri sensi. Infatti, quando noi ascoltiamo, gustiamo, sentiamo odore, tocchiamo, noi non emettiamo niente fuori di noi, ma riceviamo dal di fuori ciò che stimola il senso corrispondente... Ecco perché egli ha pensato che niente sarebbe uscito fuori dagli occhi, ma che le immagini dovessero esse stesse entrare negli occhi. Però questa opinione è smentita dal fatto che chi guarda la propria immagine nello specchio la vede come se essa si fosse rivoltata per guardarlo, mentre essendo partita da noi in una posizione diritta, essa una volta separata, dovrebbe mostrare la sua parte posteriore, in modo che la sinistra rispondesse alla sinistra, la destra alla destra. Infatti l'attore che si leva la maschera la vede dalla parte che copriva il viso, cioè non di faccia, ma per la parte interna.

Vorrei poi domandare a quel filosofo se le immagini si staccano dai corpi soltanto quando uno li vuol guardare, o se i simulacri balzano da tutte le parti anche quando nessuno li percepisce. Perché se egli della prima opinione, gli vorrei domandare sotto quale impero sono questi simulacri, perché possano essere sempre così a disposizione di chi guarda, in modo che non appena uno vorrà girar lo sguardo, essi gireranno insieme. Se egli preferisce la seconda proposizione, che cioè i simulacri si distacchino con continuità, vorrei domandargli per quanto tempo le loro parti resteranno coerenti, dato che non hanno nessun legame per mantenersi tali, e se anche fossimo d'accordo che questi simulacri si conservano, come potranno conservare un certo calore, la cui natura benché sia incorporea non può però esistere senza corpo. Inoltre chi potrà credere che non appena uno avrà volto gli occhi da una parte, immediatamente gli verranno incontro le immagini del cielo, della terra, dei fiumi, delle praterie, delle navi, delle moltitudini, e di una miriade di altre cose che noi vediamo con un colpo d'occhio, tenendo conto soprattutto che la pupilla che permette la vista è estremamente piccola? E come si farà a vedere tutto un esercito? I simulacri, partiti da ogni soldato, si raggrupperanno e allineati come sono, penetreranno nell'occhio dell'osservatore?

Ma perché perdere delle parole a combattere un'opinione così inconsistente, che si rifiuta da sé stessa per la sua vacuità?

Demolire era facile per tutti. Quando si trattava di costruire lo stesso signor Eustato non sorrideva più, probabilmente, e doveva sudare un po' a mettere insieme le espressioni per *varare* una teo-

ria del tipo platonico, e per concludere: « Tre cose dunque sono necessarie perché possa aversi la visione: la luce che noi emettiamo dal nostro interno; l'aria interposta che deve essere luminosa; e il corpo che dalla sua parte termina la *tensione* ».

Come si vede c'è un po' di tutto: anche di confusione di idee.

Concludendo: alla fine di questo primo periodo degli studi sulla visione e sulla luce, alcuni fatti e alcuni risultati meritano risalto speciale:

1° Un notevole gruppo di esperienze di ottica, nel senso più vasto della parola; prevalentemente nel campo della visione, ma anche al di fuori.

2° Lo sviluppo di tre correnti teoriche: quella della scuola pitagorica, che fa uscire i raggi visuali dall'occhio; quella della scuola atomistica, che fa emettere i simulacri dai corpi; quella della scuola platonica, che tenta la combinazione di tutte e due le emissioni. Una quarta ipotesi, che non sembra aver avuto seguito, per quanto sostenuta da Aristotele, considerava la visione come effetto di un movimento tra oggetto e occhio.

3° La predominanza e la maggior vitalità della teoria della scuola pitagorica.

4° L'ingresso di questa teoria nella geometria, con conseguente definizione del « raggio visuale », emesso dall'occhio, rettilineo, riflessibile e rifrangibile.

5° La nascita dell'« ottica geometrica » e della « prospettiva », con le leggi della riflessione, e con prodromi interessanti della legge della rifrazione e di quella del percorso ottico minimo.

6° L'idea, sia pure allo stato embrionale, che dalle sorgenti luminose venisse irradiato un *quid*, a cui è stato dato il nome di *lumen*, costituito da una miriade di particelle minutissime e velocissime, capace di riempire tutto lo spazio, e capace anche di agire sugli occhi fino a far sentire dolore.

Non si può dir poco.

Il carattere di questo primo periodo di ricerca è quello generale che si ritrova tutte le volte che l'indagine affronta un argomento di grande complessità; l'eterogeneità delle nozioni, del linguaggio, delle osservazioni, delle conclusioni; in poche parole, l'accozzaglia e la confusione. Periodo indispensabile, perché proprio dallo studio di questo primo materiale sperimentale e razionale i successori po-

tranno poi ricavare l'ordinamento, la classificazione, l'inquadratura, la specializzazione, la teoria.

Ora, nel complessissimo fenomeno ottico fondamentale, la visione, da cui sono cominciati, necessariamente e logicamente, gli studi ottici, entrano fattori geometrici, fisici, fisiologici e psicologici, a cui corrispondono altrettante branche dell'ottica, vaste e ricche di teoria, di esperienza e, ancor oggi, di mistero.

Ebbene in quel primo periodo della storia della luce, assistiamo a una miscela indistinta di queste quattro scienze; ma assistiamo anche alla separazione della prima di esse dal resto della massa: l'ottica geometrica.

In tutto il resto prevale, così all'ingrosso, il gruppo dei concetti e degli studi di natura psicologica. Il primo oggetto di studio era stato, come quasi sempre, l'individuo stesso che studiava: il suo pensiero matematico, e la sua psiche.

Occorreva un altro gruppo di secoli perché l'indagine si estendesse al mondo periferico dell'individuo, e al mondo esterno. E, di conseguenza, le idee, relativamente alla luce, si affinassero e si definissero meglio.

Nel corso di questo capitolo è stato presentato ciò che ci è giunto di più notevole del lavoro a proposito della luce e della visione compiuto dalla famosa filosofia greco-romana fino all'inizio dell'Era volgare. Ma prima di passare all'ottica nel Medio Evo, è interessante richiamare delle considerazioni fatte recentemente [39] e molto interessanti. Per la prima volta è stata concentrata l'attenzione sopra un documento di venticinque secoli fa, da cui si deducono informazioni indiscutibili e preziose circa l'invenzione delle lenti ustorie. Si tratta di un brano di una commedia del celebre Aristofane [40], *Le nuvole*, che fu rappresentata ad Atene, in occasione dei grandi giochi dionisiaci, in onore di Bacco, nel marzo del 423 a. C. È una delle 11 commedie di Aristofane che ci sono giunte, ed è una satira dell'educazione sofista: in una breve scena viene presentato Socrate a colloquio con Strepsiade; il primo è il ben noto filosofo; il secondo sarebbe il tipo dell'artigiano intelligente

[39] Cfr. V. Ronchi, *Altro è l'invenzione delle lenti e altro è l'invenzione degli occhiali*, Atti della Fondazione Giorgio Ronchi, XXXV, n. 3, 1980, pp. 314-22.
[40] Aristofane nacque ad Atene nel 450 e morì nel 388 a. C.

e intraprendente. La commedia è stata tradotta in tutte le principali lingue moderne, ed è notissima. Chi sa quanti letterati hanno letto la scena seguente, che riportiamo testualmente da una delle tante traduzioni, perché molte delle parole che vi sono contenute hanno un valore mai rilevato da nessuno;

SOCRATE Benissimo, ma da parte mia ti voglio proporre un'altra idea ingegnosa. Se ti citassero per il pagamento di cinque talenti, come faresti ad annullare tale citazione?

STREPSIADE Come? Come? Non lo so; bisognerebbe pensarci.

SOCRATE Non ti arrovellare troppo.

STREPSIADE Ho trovato un mezzo per annullare la citazione: un mezzo molto abile, ne converrai tu stesso.

SOCRATE Quale?

STREPSIADE Hai visto nelle mesticherie, quella pietra bella, limpida, trasparente, con cui si accende il fuoco?

SOCRATE Il cristallo, vuoi dire.

STREPSIADE Sì. Ebbene, che ne diresti della mia idea, se quando il cancelliere scrive la citazione, tenendomi a una certa distanza, così, con questa pietra, io facessi fondere al Sole la citazione?

SOCRATE Veramente molto ingegnoso per gli Dei!

STREPSIADE Ah! Come sono orgoglioso di aver ideato il modo di distruggere una citazione di cinque talenti!

Per giudicare l'efficacia del processo ideato da Strepsiade, bisogna ricordare che il cancelliere avrebbe scritto la citazione su una tavoletta di cera.

Da queste poche righe ci viene comunicato, dopo venticinque secoli, che già nel 423 a. C. esistevano delle « pietre belle, limpide, trasparenti », che venivano fatte attraversare dalla radiazione solare e, a una certa distanza, davano fuoco a sostanze infiammabili, e, secondo Strepsiade, potevano anche fondere una tavoletta di cera, su cui era scritto qualche cosa che si voleva distruggere. Non vi è alcun dubbio che si trattava di una pietra capace di concentrare la radiazione che l'attraversava, e quindi non poteva essere altro che quello che oggi si chiama « lente ustoria ».

Ma alcuni particolari del dialogo sopra riportato meritano di essere messi in evidenza: prima di tutto, Strepsiade risolve immediatamente il problema postogli da Socrate e ciò è indice sicuro che le lenti ustorie gli erano familiari.

In secondo luogo, Socrate capisce subito di che si tratta, e

aggiunge la qualifica che si trattava del « cristallo », e quindi era familiare anche per lui.

In terzo luogo, ci viene data la notizia che tali ordigni ustorii si acquistavano correntemente nei negozi aperti al pubblico.

Si può concludere che questa informazione dataci da Aristofane ci rende noto che nel V secolo a. C. le lenti convergenti erano largamente usate come mezzi per accendere il fuoco e quindi la loro introduzione nell'uso doveva risalire a una data notevolmente anteriore. Questa conclusione si può trarre oggi (e da appena qualche anno) perché il brano sopra riportato è venuto nelle mani di uno storico dell'ottica degli occhiali. Non è da escludersi che altri brani affini si trovino nelle letterature antiche e che in futuro siano osservati da persone competenti e portino a definirne meglio la data e il luogo della invenzione delle lenti ustorie.

Dovremo ritornare nel seguito di questa storia sullo sviluppo di questo argomento, che ha interessato gli studiosi di ottica di diversi periodi; ma già al termine del gruppo di notizie contenuto nelle pagine precedenti, divengono rilevanti certi particolari, completamente nuovi, anche difficilmente credibili.

Abbiamo riportato la scena de *Le Nuvole* di Aristofane alla fine del Capitolo in cui sono stati esposti i contributi più interessanti dell'ambiente scientifico e filosofico greco-romano, proprio per mettere in evidenza che non si trova mai neppure il più piccolo accenno all'esistenza « nei negozi al pubblico » delle lenti per accendere il fuoco.

Il che vuol dire che la scienza e la filosofia se ne sono disinteressate completamente. Questo comportamento, che si dovrebbe giudicare incredibile, collima in maniera meravigliosa con uno studio intrapreso da noi più di mezzo secolo fa, e che in questo lungo periodo ha ricevuto continue conferme dai nuovi documenti via via venuti alla luce, perché vi era uno che li cercava e li valorizzava.

Quando si afferma che tutto l'ambiente scientifico per due millenni ha prima ignorato l'esistenza delle lenti ustorie; poi quando non ha più potuto ignorarle, le ha svalutate, le ha condannate come ordigni fallaci, indegni di essere considerati seriamente, si incontra l'incredulità più assoluta di tutti gli ascoltatori; ma ora la storia riportata nelle pagine precedenti ce ne dà una dimostrazione meravigliosa, che costituisce un complemento insospettato a ciò che abbiamo sostenuto già da numerosi decenni, ma soltanto nei riguardi di un lungo periodo dell'Era volgare.

A questo punto, è molto significativo il richiamo a una citazione riportata a pag. 23 dove s iricorda che (riportiamo le parole già scritte) « l'ultima Proposizione della *Catottrica*, la 31ª, dice testualmente così: ' Con gli specchi concavi opposti al Sole si può riuscire ad accendere il fuoco ' ». Questo lo scriveva Euclide, e lo ripeteva Teone Alessandrino, nell'edizione dei testi di Euclide ristampati sette secoli più tardi.

Non solo, ma Euclide riporta anche (in un postulato della *Catottrica*) una esperienza di rifrazione dei raggi. Ma sulle lenti, silenzio assoluto.

Non ci vuol molto a trovare una giustificazione di questo modo di procedere: il funzionamento degli specchi concavi era noto e i matematici si potevano vantare di esserne padroni; per le lenti, erano tutti disarmati, e non vi era altra soluzione che ignorarle, e non parlarne mai, se si volea evitare di dimostrare la propria incompetenza agli ascoltatori.

Presto vedremo come si sviluppò questo ramo della storia dell'ottica; e sarà uno studio molto istruttivo.

Capitolo secondo

L'OTTICA NEL MEDIO EVO

Per rendersi conto della evoluzione delle idee nel susseguirsi dei secoli, relativamente al meccanismo della visione e alla natura della luce, conviene mettere in risalto alcuni punti deboli del complesso di studi riassunti nel Capitolo precedente.

Si tratta di questioni d'indirizzo più o meno implicitamente ammesse e sottintese da tutti e come tali non discusse. Perché se qualcuno le avesse isolate, messe in evidenza e sottoposte a critica, certamente ne sarebbero apparsi i lati deboli; tanto più che le persone intente in questi argomenti hanno dimostrato senno e acume ben superiori all'ordinario.

Il primo preconcetto che ritardò e sviò per molto tempo lo sviluppo delle idee fu nel considerare la visione di un corpo come un'operazione globale, unitaria, inscindibile. Un oggetto grande o piccolo che fosse, doveva esser visto nel suo complesso. Almeno nella documentazione che ci è occorso di conoscere, non è mai espresso il pensiero che il vedere un oggetto potesse essere l'insieme delle operazioni necessarie per vederne le singole parti elementari. Pare che tutti i filosofi indistintamente pensassero esser tanto più facile attuare la visione, quanto più grosso era l'oggetto, e tutti rifuggissero dall'esame del caso della visione di una stella o di un oggettino minuscolo, come di un caso limite fuori dell'ordinario, e degno di soluzione soltanto dopo aver risolto il vero caso interessante: quello di un corpo visibile sotto un angolo grosso.

E difatti il motivo ripetuto decisamente ed esplicitamente da tutti è che la visione avviene per un cono o una piramide, che ha

il *vertice nell'occhio*, e la base sull'oggetto osservato; la concezione prospettica per eccellenza.

Evidentemente gli sforzi teorici erano protesi a far entrare le famose scorze o immagini entro l'occhio, e nel frattempo nessuno si preoccupava di considerare il caso limite in cui il cono avesse avuto un'apertura angolare trascurabile.

E mentre si allargava la base di questo cono prospettico, se ne diminuiva il vertice, fino a far diventare *un punto* l'intero occhio. Semplificazione matematica utilissima per la prospettiva; ma deleteria per la teoria della visione. Perché non si risolvono le difficoltà trascurandole. In questo consisteva appunto il secondo errore di indirizzo. Invece di indagare la struttura dell'occhio per risalire alle cause, ossia per indurre ciò che era possibile sulla natura dell'ente atto a stimolarlo (come aveva cominciato Empedocle) i filosofi avevano finito per vedere nell'occhio soltanto un organo sensibile puntiforme, di dimensioni e di struttura trascurabile per la funzione che era chiamato a esplicare.

Nei secoli dopo Tolomeo, non è possibile seguire lo sviluppo delle idee attraverso una documentazione esauriente. A distanze di tempo enormi, in confronto a quello che era avvenuto nei secoli precedenti ed a quello che è avvenuto nell'Evo moderno, troviamo qualche testo, che, sia col contenuto esplicito, sia col tenore del linguaggio, dimostra che nel frattempo l'esperienza e la teoria avevano fatto progressi; senza saper a chi riconoscerne il merito.

Un contributo decisivo fu portato dalle scoperte fisiologiche e anatomiche di Galeno [1]; fra i tanti suoi meriti va notato quello di aver descritto la struttura dell'occhio, e, inquadrando anche questo nel complesso degli organi sensori dell'organismo, mette in evidenza la funzione del nervo ottico nella visione; anzi arriva a vedere addirittura nel nervo l'elemento più importante per la visione stessa. Egli lo considera a guisa di canale attraverso il quale passa del fluido visuale proveniente dal cervello; e ciò in analogia ai fluidi affini che affluiscono a tutti gli organi dei sensi, appunto per renderli sensibili. Il fluido visuale, attraverso la rètina, che costituisce il fondo oculare, si dovrebbe diffondere nell'umore vitreo, raggiungere il cristallino e renderlo sensibile; cioè atto a sentire la luce proveniente dall'esterno.

A proposito della quale luce Galeno non si pronunzia decisa-

[1] Galeno di Pergamo visse fra il 130 e il 201 d. C.

mente; la considera un *fluido* diffuso dal Sole nell'aria come il cervello emette il suo nei nervi, cosicché l'aria fa per la luce esterna quello che i nervi fanno per il fluido visuale. Senza attardarsi a definire la natura del fluido esterno, si limita a considerarne la propagazione rettilinea ormai assodata dall'ottica geometrica; e sulle orme di questa, considera il cono prospettico secondo cui avviene la visione.

In conclusione Galeno si riattacca alle idee platoniche: un fluido esterno verso l'occhio, e uno interno che però non esce dall'occhio, ma lo rende sensibile e quindi atto a essere impressionato dall'altro fluido. Per altro comincia a entrare in giuoco la struttura dell'occhio, sia pure con un concetto sbagliato: che il cristallino ne fosse la parte sensibile.

Questo complesso di nozioni ha avuto un'influenza decisiva sullo sviluppo delle teorie del meccanismo della visione, e quindi della luce. Però le vicissitudini del periodo storico che seguì l'epoca di Galeno spostarono verso il Medio Oriente i centri di cultura che si interessavano a questo genere di studi. Mentre l'ambiente filosofico e scientifico occidentale attraversava una crisi profonda, si manifestavano nel mondo islamico segni di attività culturale degni di molta attenzione. Purtroppo la consultazione dei documenti relativi è resa difficile dalla loro rarità, e anche dal fatto che non pochi sono tuttora scritti in arabo. Le notizie che riportiamo sono in gran parte di seconda mano, o perché desunte da traduzioni latine (alcune anche assai tarde) degli originali arabi, o perché prese da opere di studiosi di questi ultimi tempi. Questi ultimi, senza dubbio valentissimi e degni di piena considerazione, proprio in quanto competenti nella interpretazione della lingua originale dei testi, si sono accinti all'opera con una preparazione prevalentemente umanistica o filologica e quindi si sono trovati certamente in difficoltà nell'interpretare fedelmente il pensiero di autori che non solo hanno scritto nell'arabo di circa dieci secoli or sono, ma hanno usato dei termini che si debbono dire « tecnici », la cui traduzione fedele richiede una conoscenza profonda della materia.

Perciò le notizie che qui saranno riferite circa il contributo della scuola del Medio Oriente al problema della luce saranno piuttosto sommarie; tuttavia saranno sufficienti a dimostrare quanta attenzione sia stata dedicata ai problemi che interessano la nostra storia, in un periodo di alcuni secoli attorno al 1000 d. C.

In primo luogo è da segnalare che in quel periodo, e special-

mente nel IX secolo d. C., fiorì a Bagdad una scuola medica molto importante, di cui devesi ricordare, in questa sede, l'interessamento per la struttura del globo oculare e dell'apparato visivo in generale, fino alla discussione circa la sede della sensazione visiva. In questo campo hanno avuto molto seguito, nel corso del Medio Evo, le opere di tre medici arabi.

Al IX secolo appartiene Hunain ibn Is-haq [2], che si rese famoso per aver tradotto dal greco in siriaco le opere di Galeno, mentre un suo collaboratore, Hubaish, le traduceva dal siriaco in arabo. La sua fama raggiunse l'occidente, dove fu conosciuto col nome latinizzato di Johannitius.

Al secolo successivo appartiene Alì ibn Isa, conosciuto anche col nome di Jesus Halì, e che può esser considerato un continuatore dell'opera di Hunain ibn Is-haq, ed anche Rasis o Razis (Abu Bekr Muhammed ibn Zakariya al Razi) che fu un famoso caposcuola del principio del X secolo [3].

Le opere di questi maestri della medicina furono tradotte in latino: particolarmente interessante una compilazione che sotto il titolo *De oculis* contiene la maggior parte delle idee dell'Hunain e che per lungo tempo è stata attribuita a Galeno. Pure in latino fu tradotta un'opera imponente, una vera enciclopedia medica in 25 libri, di Razis, col titolo *Continens medicinae*. Queste opere durante il Medio Evo costituirono dei testi classici. Però la loro importanza riguarda sopratutto la medicina, anche se l'oculistica vi è stata trattata ampiamente, sia per l'anatomia del globo oculare, sia anche per i tentativi di teoria della visione. Però in sostanza si tratta di teorie del tipo galenico, e non interessano la nostra storia, se non per il fatto che l'interesse concentrato sull'occhio e sulla sua costituzione e la sua fisiologia doveva sfociare in una considerazione del fenomeno visivo più legata ai fattori fisico-fisiologici, che non a quelli geometrici.

La necessità di dare alle teorie della visione un indirizzo meno matematico e più fisico-fisiologico fu affermata in modo esplicito e particolareggiato da un altro scienziato arabo famoso: Abu Ysuf Yaqub ibn Is-haq, conosciuto col nome abbreviato di Alkindi [4]. La

[2] Hunain ibn Is-haq nacque a Hira (Mesopotamia) nell'809, e vi morì nell'873. Fu medico del califfo Mutawakkil.

[3] Di Razis si sa che morì a Bagdad verso il 930.

[4] Alkindi visse a Basra e a Bagdad tra l'813 e l'873 all'incirca. Ebbe grande fama e veniva indicato come « il primo filosofo arabo ».

sua produzione scientifica è stata molto vasta e anche molto vasta è stata la ripercussione che essa ha avuto in numerosi campi della fisica. Anche gli studi di storici della scienza sull'opera stessa costituiscono un gruppo di lavori di mole ingente. Delle sue numerose opere, per la nostra storia interessano specialmente quella che nella traduzione latina portò il titolo *De aspectibus*, e quella dal titolo *De radiis stellatis* o *stellicis*.

Quest'ultima [5], ancora allo stato di manoscritto, è più che altro un'opera a sfondo astrologico, riguardando gli influssi stellari sul mondo terrestre; ma interessa la nostra storia perché vi è affermato il concetto che non soltanto le stelle agiscono in tutte le direzioni per mezzo di *radii* (che si dovrebbero intendere come *raggi*, nel senso geometrico della parola) ma anche tutte le cose di questo mondo, agiscono per mezzo di tali entità. E non soltanto i corpi materiali (*substantia*), ma anche quelli immateriali, (che allora si chiamavano *accidentes*) come addirittura le *voces* [6]. Proprio come le stelle.

Ma ben più importante è il *De aspectibus*. Qui Alkindi tratta il problema ottico esplicitamente e particolarmente, e mentre da una parte afferma che la visione deve avvenire per mezzo di raggi capaci di agire fisicamente sull'occhio, dall'altra attacca a fondo la teoria dei raggi visuali, accusandoli di essere inesistenti, cioè di essere astrazioni matematiche, e come tali incapaci di agire fisicamente e fisiologicamente. Perché, egli rileva, per agire sull'occhio è necessario avere una struttura e quindi tre dimensioni, mentre i raggi visuali ne hanno una sola.

Il « raggio » esce dalle mani di Alkindi trasformato e perfezionato. Egli scrive: « Quello che vediamo dalla rettilinearità delle fini ombre dei corpi proiettate da *lumina* che entrano per le finestre, ci porta necessariamente a questo, che il percorso dei raggi uscenti da corpi luminosi avviene secondo linee rette » [7] Il passo fatto in avanti è considerevole, quando si confronti questo concetto con

[5] Di questo manoscritto, che si trova nella Bibliothèque Nationale de Paris, dà alcune notizie la dr. Graziella Federici Vescovini, nel suo volume *Studi sulla prospettiva medievale*, G. Giappichelli Editore, Torino 1965.

[6] « Manifestum est quod res huius mundi sive sit substantia sive accidens, radios facit suo modo ad instar siderum », ivi, p. 45, nota 41.

[7] « Quod vero videmus ex rectitudine finium umbrarum corporum in latitudine et luminibus per fenestras ingredientibus, necessario ducit nos ad hoc, ut transitus radiorum procedentium a corporibus luminosis fiat secundum rectitudinem rectarum linearum ». Alkindi, *De aspectibus*, edito da A. A. Björnbo, S. Vogl, Teubner, Lipsia 1912, p. 4.

quello dei raggi visuali, da un lato, e con le idee vaghe ed embrionali di Lucrezio.

Alkindi spinge ancora avanti la sua idea, affermando esplicitamente che la visione avviene non per mezzo di simulacri o di figure che si propagano per l'aria, ma per effetto di raggi rettilinei, capaci di agire sull'occhio umano. Però, occorreva dire di più: bisognava spiegare come era possibile che dei raggi « fisici », dotati di lunghezza, larghezza e profondità, entrando nell'occhio vi agissero in modo da far giungere alla psiche le informazioni atte a permetterle di ricostruire la rappresentazione del mondo fisico, che aveva inviato i raggi stessi, e cioè il mondo apparente. Non sembra che Alkindi abbia portato un contributo effettivo alla soluzione di questo problema. Il suo intervento è stato senza dubbio positivo ed efficace, ma doveva esser utilizzato per dare al grosso problema della visione una soluzione non soltanto di massima, ma definita nei particolari. Ciò spiega perché nonostante il duro attacco di Alkindi, la teoria dei raggi visuali continuò ancora per dei secoli ad esser professata con piena convinzione da larghi strati dell'ambiente scientifico.

Però, nella scia di Alkindi, doveva presto compiersi un passo molto importante, sulla via che doveva continuare fino ai giorni nostri. Questo passo fu compiuto da uno dei fisici più noti della scuola araba: Abu Alì Mohammed ibn al Hasan ibn al Haytham, conosciuto in Occidente col nome di Alhazen, nel periodo di transizione tra il X e l'XI secolo d. C. [8].

Anche l'Alhazen, come l'Alkindi, ebbe una produzione molto vasta e con interessi molteplici; ma per la nostra storia interessa particolarmente il volume in sette libri, che ebbe il titolo di *De aspectibus* nella traduzione latina che cominciò a circolare in Occidente, manoscritta, fino dal XII secolo. I brani che citeremo nel seguito sono tratti dalla traduzione che, per interessamento di Pietro Ramus, Federico Risner pubblicò nel 1572 a Basilea, col titolo *Opticae Thesaurus libri septem, per Episcopios*, traducendoli direttamente da due copie dell'originale arabo. È stata questa la prima edizione stampata.

Il contributo ottico dell'Alhazen è stato oggetto di molti studi, anche recenti, e tra i più noti si possono ricordare quelli del Wiedemann e di G. Sarton. In ciò che andiamo ad esporre si sente in

[8] Alhazen nacque a Basra verso il 965, passò la maggior parte della sua vita in Egitto e morì al Cairo nel 1039 d. C.

modo molto evidente l'influsso delle idee che hanno avuto inizio nella scuola epicurea, come ci risulta dal *De rerum natura* di Tito Lucrezio Caro, e che poi hanno avuta una evoluzione notevolissima nell'opera di Alkindi. Tuttavia l'esposizione dell'Alhazen è molto ordinata e conseguente (e non poco merito di questo ordine pare che spetti al Risner) e conviene quindi seguirla organicamente nelle sue parti essenziali, seguendo il filo logico che l'autore le ha assegnato.

L'indirizzo dello studio è nettamente fisico-fisiologico. La prima Proposizione del I Libro suona così: « La luce diretta e il colore illuminato feriscono gli occhi » [9].

L'Alhazen comincia dunque con lo schierarsi senza mezzi termini dalla parte di coloro che ammettevano l'esistenza di un agente fisico esterno all'individuo senziente, appunto sulla scia di Alkindi. Fin da questo primo titolo risalta il concetto contenuto nella parola « feriscono »; concetto che richiama il danno che gli occhi possono risentire dall'azione troppo prolungata e diretta del sole, della quale Lucrezio aveva già fatto menzione.

Infatti l'autore passa alla dimostrazione di questa tesi fondamentale, con ragionamenti di questo tipo:

> Abbiamo trovato che gli occhi quando guardano delle luci fortissime ne risentono dolore e danno; infatti un osservatore che si rivolge verso il sole, non lo può veder bene, perché gli occhi gli dolgono a causa della sua stessa luce. E similmente avverrà, se guarda uno specchio lucido, illuminato dal sole, con l'occhio posto nel fascio di luce solare riflesso dallo specchio: sentirà dolore a causa della luce riflessa, che gli giunge all'occhio dallo specchio, fino a non poter aprire l'occhio stesso per guardare quella luce [10].

Dunque se l'occhio soffre guardando un oggetto fortemente splendente, non si può dire che ci sia qualche cosa che va dall'occhio verso

[9] Alhazen, *Opticae Thesaurus libri septem, nunc primum editi a Federico Risnerio, Basileae, per Episcopios, 1572.* « Lux per se et color illuminatus feriunt oculos ».

[10] Ecco il testo autentico: « Invenimus quod visus, quando inspexerit luces valde fortes, fortiter dolebit ex eis, et habebit nocumentum: aspiciens enim, quando aspexerit corpus solis, non potest bene aspicere ipsum, quoniam visus eius dolebit propter ipsius lucem. Et similiter quando inspexerit speculum tersum, super quod ascendebat lux solis, et fuerit visus eius in loco, ad quem reflectitur lux ab illo speculo; dolebit iterum propter lumen reflexum, perveniens ad visum suum a speculo, et non poterit aperire oculum ad inspiciendum lumen illud ».

l'oggetto, perché non vi sarebbe ragione di soffrire di fronte a un oggetto piuttosto che di fronte a un altro; ma è necessario ammettere qualche cosa che va dall'oggetto all'occhio; e questo qualche cosa ha anche la proprietà di riflettersi sullo specchio.

Un'altra serie di osservazioni conforta l'autore nella sua tesi. Si tratta di un'esperienza di natura fisiologica: se uno guarda un oggetto bianco *mundum* e quindi ben splendente, e vi fissa lo sguardo e poi volge lo sguardo stesso da un'altra parte, l'occhio è come accecato, e solo con un po' di tempo riprende la sua facoltà, che gli permetterà di vedere le nuove cose a cui ora è rivolto [11].

Alhazen continua a descrivere altre esperienze affini, ottenendo lo stesso effetto (oggi si direbbe: di abbagliamento e di lunga persistenza delle immagini retiniche) anche con la luce del giorno, anziché con quella diretta del sole; e anche con la luce del fuoco.

Segue un'esperienza notevole, in quanto mostra l'intenzione dell'autore di svincolare l'idea di luce da quella di corpo luminoso o illuminato. Un osservatore in una stanza guarda fissamente un'apertura del soffitto, illuminata dalla luce del giorno, sul cielo; se rivolge quindi lo sguardo verso una parte oscura della stanza, continua a vedere la figura dell'apertura su fondo scuro. E aggiunge un'altra osservazione importante: « e se chiude il suo occhio, vi vedrà ancora quella figura » [12].

Qui Alhazen esagera; ma gli si può perdonare. Egli pretende di *vedere la luce*, e non pensa che in fin de' conti l'osservatore vede globalmente i corpi diffondenti, come il pulviscolo sospeso per aria. Non è il caso di rimproverargli l'errore; devesi invece segnalare l'ordine progressivo delle sue esperienze nell'intenzione di dimostrare l'esistenza di una impressione dall'esterno sull'occhio da parte della luce che entra dentro una camera oscura, attraverso un foro, rivolto al cielo, ossia dove non è nessun oggetto. Ebbene ancora l'occhio ne riceve quell'impressione persistente per qualche tempo, come quando si guarda un corpo illuminato ben chiaro.

Devesi poi segnalare l'esperienza nuova: chiudendo gli occhi

[11] « Et invenimus iterum quando aspiciens intuetur corpus mundum album, super quod ascendebat lux solis, et moretur in aspectu ipsius: deinde convertat visum suum ab eo ad locum obscurum, debilis lucis; quod fere non poterit comprehendere res visibiles illius loci comprehensione vera; et inveniet coopertorium quasi inter visum et ipsas; deinde paulatium discooperietur, et reverteretur visus in suam dispositionem ».

[12] « ... et si clauserit oculum suum: inveniet iterum in eo formam illam ».

l'impressione persiste ancora! Alhazen conclude senz'altro: « Tutto ciò dimostra dunque che la luce esercita qualche azione sull'occhio » [13].

Ma non si ferma qui: dopo aver esaminato e sperimentato in luce bianca, ripete le esperienze con oggetti colorati, e ne conclude ancora: « Tutto ciò dimostra che i colori illuminati agiscono sull'occhio » [14].

Abbiamo insistito un po' nel riferire queste esperienze, perché si tratta di un testo assai poco conosciuto, mentre è sorprendente che verso il mille d. C. vi fosse un fisico operante con un criterio e un metodo sperimentale degno dell'epoca moderna.

Non si può disconoscere che vi è un bel progresso dal trattato di Euclide (e sì che era Euclide) a questo primo capitolo del testo di Alhazen.

Già in queste prime pagine vi sono due cose da rilevare: una è il tono polemico; l'autore ha l'aria di dire delle cose contrarie all'opinione generale, non di porre delle basi ormai pacifiche. La seconda è il concetto contenuto in quella parola « disposizione » (*dispositio*) dell'occhio che ha la facoltà di vedere senza il disturbo dell'abbagliamento o della persistenza delle immagini: in seguito Alhazen spiegherà che cosa intendeva dire con questa parola.

Nella seconda Proposizione dello stesso libro, l'autore riporta un numero notevole di esperienze, che oggi si direbbero di « sensitometria visiva ». Comincia col far notare che le stelle si vedono di notte e non di giorno soltanto perché di giorno c'è di mezzo il cielo illuminato; ripete esperienze affini con fuochi intensi e su oggetti dotati di particolari minuti, come miniature e scritture, e dimostra che la illuminazione eccessiva o troppo debole, oppure la interposizione di fiamme in condizioni cattive, come suol dirsi con

[13] « Omnia ergo ista significant quod lux operetur in visum aliquam operationem ».

[14] « Et invenimus iterum quod, quando aspiciens inspexerit viridarium multae spissitudinis herbarum, super quod oriebatur lux solis: et moretur in aspiciendo ipsum: deinde convertat suum visum ad locum obscurum: inveniet in illo loco obscuro formam coloratam a virore illarum herbarum: deinde si aspexerit in ista dispositione visibilia alba; et fuerint illa visibilia in umbra et ex loco debilis lucis: inveniet colores istos admistos cum virore: et si clauserit oculum suum: iterum inveniet in ipso formam lucis et formam viroris: deinde discooperietur illud, et auferetur. Et similiter si aspexerit corpus coloratum colore caeruleo vel rubeo, vel alio colore forti scintillante, super quod oriebatur lux solis: et moretur in aspiciendo ipsum: deinde auferat visum suum ad visibilia alba in loco debilis lucis, inveniet colores illos admistos cum illo colore. Ista ergo significant quod colores illuminati operentur in visum ».

la frase *contro luce*, rendono invisibili tanti oggetti o particolari di oggetti che sono visibili e percepibili agevolmente in buone condizioni di luce.

Nel terzo Capitolo del I Libro dimostra, ancora con molte osservazioni, che il tono dei colori dei corpi si modifica al cambiare della luce illuminante.

Con questo primo gruppo di esperienze e di considerazioni Alhazen ha inteso mettere fuori giuoco l'idea che dei raggi uscissero dall'occhio per andare a trovare gli oggetti. Poi, contrariamente ai suoi numerosi predecessori, per i quali demolire era facile, ma costruire risultava impossibile, egli passa alla fase costruttiva, superando le difficoltà principali contro le quali erano andati ad infrangersi tutti coloro che nei secoli passati avevano pensato ad un quid che dagli oggetti entrava dentro l'occhio.

Bisognava evitare l'idea della « èidola » e delle scorze, che non reggevano a una critica anche elementare; e insieme bisognava evitare l'idea di un fluido senza struttura che non avrebbe potuto arrecare all'occhio informazioni sulla forma, le dimensioni e la situazione dell'oggetto.

Alhazen riesce a trovare la chiave del meccanismo ed istrada il ragionamento per quella via, sulla quale poi si è proceduto fino ai giorni nostri. È strano come un uomo di tanto merito sia quasi dimenticato.

Egli, dopo aver descritto nel Capitolo quarto della sua opera la struttura dell'occhio, prendendola fedelmente da Galeno e dalla scuola medica araba di cui si è detto sopra passa a discutere del meccanismo della visione, nel Capitolo seguente: « La visione avviene per raggi emessi dall'oggetto verso l'occhio » [15].

In questo titolo è sostanzialmente riprodotta l'idea che Alkindi aveva sostenuto più di un secolo prima; l'Alhazen l'accetta senza riserve.

E la dimostrazione comincia così: « È già stato dichiarato (cap. I) che da qualunque corpo illuminato con qualsiasi luce emana della luce diretta verso la parte opposta, qualunque essa sia » [16]. Non

[15] « Visio fit radiis a visibili extrinsecus ad visum manantibus ». Ivi, Libro I, Cap. V, p. 7.

[16] « Jam declaratum est superius (Cap. I) quod ex corpore quolibet illuminato cum quolibet lumine exit lux ad quamlibet partem oppositam ei. Cum ergo visus opponitur alicui rei visae, et fuerit res illa illuminata cum quolibet lumine, ex lumine rei visae veniet lumen ad superficiem visus. Et declaratum

è questa un'ottica nuova, ben diversa da quella del mondo greco-romano?

Alhazen continua con logica cristallina: « Quando l'occhio si pone di fronte a un oggetto, e questo viene illuminato con una luce qualsiasi, della luce deve arrivare alla superficie dell'occhio. E siccome si è dimostrato che la luce ha la proprietà di agire sull'occhio, e che è nella natura dell'occhio di sentire la luce, bisogna concludere che l'occhio non può sentire l'oggetto visto se non per mezzo della luce che questo gli manda ».

Le « èidola » e le « scorze » sono finite. La luce va dalla sorgente sugli oggetti e questi la rimandano in tutte le direzioni e quindi anche sopra un occhio che stia di fronte.

Il passo fatto è già notevole; più per il senso di *necessità* che pervade il discorso, che per il meccanismo in sé. Rimaneva da risolvere il problema fondamentale: questa luce che entrava nell'occhio come indicava le forme e la struttura dell'oggetto all'organo sensibile?

Alhazen lancia l'idea: se nell'occhio vi fosse semplicemente sensibilità, senza elementi direzionali, l'occhio non potrebbe vedere che luci e colori promiscui e indistinti; la visione ordinata si può spiegare ammettendo che *ad ogni punto* dell'oggetto osservato corrisponda *un punto* impressionato nell'occhio.

Ecco il passo decisivo in avanti.

Al tempo di Alhazen, nonostante l'ottica di Euclide e di Tolomeo e di Eliodoro, le nozioni sulla rifrazione erano ancora troppo modeste, perché si potesse tracciare la traiettoria della luce attraverso le « tuniche » trasparenti dell'occhio, anche in forma schematica. Questo stato di cose non solo giustifica gli errori commessi da Alhazen nel definire i particolari delle sue idee, ma aumenta straordinariamente il valore di queste sue idee, dando loro un carattere addirittura geniale e quasi profetico.

Per quanto l'entrare in particolari ci allontani dal nostro argomento, vale la pena di accennare alle linee generali del ragionamento. L'Alhazen riprende un'idea che da tempo era stata avanzata nell'ambiente scientifico (e che Alkindi aveva dimostrato falsa e inaccettabile) e cioè che un raggio incidendo obliquamente su una superficie trasparente viene rifratto, cioè piegato e con ciò risulta forte-

fuit quod ex proprietate lucis est operari in visum, et quod natura visus est pati ex luce. Dignum est ergo, ut non sentiat, visus lumen rei visae, nisi ex lumine veniente ex ea ad visum ». Ivi, p. 7.

mente indebolito. Ora di tutto il fascio di raggi che da un punto dell'oggetto guardato arrivano sulla superficie della cornea, uno solo è perpendicolare, e quindi attraversa la cornea senza essere rifratto, e questo solo conserva completa la sua efficacia; non solo, ma siccome secondo lo schema dell'occhio che egli aveva accettato, come si è detto sopra, tutte le « tuniche » interne erano concentriche, questo raggio le attraversava tutte senza subire alcuna rifrazione, mentre gli altri, penetrati entro la pupilla, anche vicinissimi a quello normale alla superficie della cornea, venivano rifratti, cioè troncati e come resi inefficaci. Con questa idea veniva superata la difficoltà sorta quando la sorgente di raggi considerata era puntiforme. I fautori delle « scorze » avevano incontrato una difficoltà quasi insuperabile a far penetrare le scorze stesse, specialmente se provenivano da una montagna, dentro la piccola pupilla di 2 mm di diametro; ora la pupilla era troppo larga per il fascio di raggi che vi arrivavano da ogni punto dell'oggetto osservato: di tutto questo fascio bisognava utilizzare un raggio solo, perché così ad ogni punto dell'oggetto sarebbe corrisposto un sol punto sulla superficie sensibile, sul « sensorio », nell'interno dell'occhio. È una concezione che oggi appare un po' stiracchiata, ma che deve essere considerata ben ardita e anzi profetica in uno che non aveva ancora definito il concetto di asse ottico e di corrispondenza fra punti dello spazio oggetto e della immagine.

Con questo Alhazen aveva superato i due scogli contro i quali, come abbiamo notato al principio di questo Capitolo, si erano fermate le teorie precedenti della visione: egli non solo aveva utilizzato i contributi di Galeno e della scuola medica di Bagdad per superare l'idea che l'occhio dovesse agire soltanto come centro di prospettiva, ma vi era penetrato nell'interno minuziosamente; inoltre aveva sminuzzato l'oggetto visibile in elementi puntiformi, facendo perdere alla visione dell'oggetto stesso il carattere di operazione globale inscindibile.

Per ciò che riguarda poi il funzionamento interno dell'occhio, Alhazen ha dovuto andare in fondo, e non fermarsi alle prime idee che abbiamo già riferito.

Partendo dallo schema ottico dell'occhio, come era stato descritto da Galeno, e ritenendo che i varî strati trasparenti fossero concentrici, e che il cristallino, posto al centro del globo oculare, fosse anche la sede della facoltà visiva, Alhazen riprende il concetto della

piramide prospettica di Euclide, ma la ricompone con quei tali raggi che partono dai singoli punti dell'oggetto e arrivano normalmente sulla superficie dell'occhio, e ne pone di conseguenza il vertice nel *centro* dell'occhio. Lungo queste rette passanti per questo centro la luce e i colori dei varî punti dell'oggetto debbono camminare *ordinatamente* e sempre conservando l'ordine anche attraverso la cornea e la pupilla, si imprimono sulla prima superficie del cristallino, che li sente. L'immagine ordinata, simile all'oggetto, è entrata nell'occhio e vi ha arrecato tutti gli elementi per produrre la visione.

Vi sono molti errori; ma vi è una struttura teorica che lascia indietro il passato e che non cadrà in avvenire.

Perché, conoscendo l'esistenza e la struttura nervosa della retina, Alhazen, ha fatto avvenire l'impressione sulla prima superficie del cristallino? Evidentemente, perché una difficoltà enorme si presentava, a chi avesse fatto progredire i raggi oltre il cristallino e quindi oltre il *centro* dell'occhio: l'ordine della figura si invertiva e sulla retina le cose sarebbero andate a rovescio. Alhazen, che con un lampo di genio aveva superato la difficoltà, insuperata da quindici secoli, di far entrare nella piccola pupilla dell'occhio la figura ordinata di qualunque oggetto guardato, fosse pur grande come una montagna o come il firmamento, si sarebbe visto crollare la sua magnifica costruzione, se questo ordine fosse stato proprio l'inverso dell'ordine naturale! Egli ha evitato la distruzione con un'acrobazia teorica: far sentire la forma della figura prima che questa si inverta, prima del centro del cristallino, per quanto non vi si trovino che superficie completamente trasparenti.

Non è questo il solo salvataggio che Alhazen è costretto a fare. Evidentemente egli sente che nella sua teoria vi è del buono e se trova delle difficoltà ancora insormontabili, ne dà una soluzione provvisoria, anche se non del tutto soddisfacente, sperando nel futuro. È la risorsa a cui hanno attinto tutti i filosofi del mondo.

Egli stesso, più tardi, trova che si vedono gli oggetti anche anteponendo alla pupilla un piccolo ostacolo come un ago, in modo che restino intercettati sicuramente alcuni dei raggi normali alla superficie dell'occhio; e trova altresì che sono visibili oggetti posti in posizioni così di fianco, che è impossibile che dai loro punti arrivino raggi normali alla cornea; oggi si direbbe all'orlo del campo visivo. Egli trova la spiegazione di tutto ciò nella rifrazione dei raggi che entrano nell'occhio non perpendicolarmente e anzi arriva alla con-

clusione, di cui si gloria in modo esplicito, che « tutta la visione ha luogo per mezzo della rifrazione » [17]. Però non si pronuncia più così decisamente sul come si conservi l'ordine della figura penetrata nell'occhio, quando sono tagliati e intercettati i raggi che oggi si dicono principali, o quando interviene la rifrazione.

Bisognava ancora percorrere un ben lungo cammino scientifico prima di avere gli elementi per eliminare le difficoltà che inceppavano la teoria di Alhazen!

Per altro, andando oltre, Alhazen, dopo aver affermato recisamente che la visione non ha luogo per mezzo di raggi emessi dall'occhio, (« visio non fit radiis a visu emissis »), viene più tardi a una specie di compromesso e afferma che la visione sembra avvenire contemporaneamente per raggi ricevuti ed emessi. Spiega che non basta l'esistenza di raggi provenienti dall'oggetto verso l'occhio, ma è necessario che questo sia diretto verso l'oggetto in modo da poter ricevere i raggi e che possegga quella « dispositio » che lo rende atto a vedere, cioè quella disposizione di cui aveva fatto cenno fino dalle prime pagine. Specifica più oltre che l'impressione di questi raggi esterni serve a dare la sensazione di luce e di colore semplicemente, e che per completare il processo visivo e vedere l'oggetto « in suo loco » è necessario un complesso di fatti di ordine psicologico, riassunti con le parole: « cognitio et distinctio antecedens » a cui poi va aggiunta « argumentatio iteranda apud visionem ».

Egli dedica un intero Libro, il terzo dei sette, alle illusioni ottiche, che chiama « deceptiones visus »; successivamente riferisce una quantità notevole di esperienze relative alla visione, al campo visivo, e alla acuità visiva, su cui purtroppo non ci possiamo trattenere, perché si allontanano troppo dal nostro argomento.

In breve: non esitiamo a riconoscere in Alhazen il vero fondatore di quella che oggi si chiama « ottica fisiologica ».

Prima di terminare questo riassunto della vasta opera di un sì grande scienziato di un millennio addietro, è necessario mettere in evidenza le sue idee sulla natura e le proprietà della luce.

Imperniandosi sulla sua teoria del meccanismo della visione, egli ha costruito un modello di luce, immaginandolo come un qualche

[17] « Visio distincta fit rectis lineis a visibili ad visum perpendicularibus. *Et visio omnis fit refracte*... Hoc autem, quod quicquid comprehenditur a visu, comprehenditur refracte, a nullo antiquorum dictum est ».

cosa che si propaga secondo traiettorie rettilinee, e che è capace di impressionare la parte sensibile dell'occhio fino anche a farla soffrire, e in ogni modo lasciandola impressionata e incapace di vedere altre cose, per un tempo più o meno breve.

Attribuisce inoltre a questa luce la proprietà di riflettersi sugli specchi, di rifrangersi attraverso le superficie trasparenti. Fa partire questa luce dai corpi luminosi e la fa diffondere tutt'intorno, attraverso i corpi diafani. A proposito dei quali mette bene in chiaro che non alterano affatto la luce che ricevono [18].

Per dimostrarlo esegue un'esperienza, che si può chiamare senz'altro la « camera oscura ». Egli mette diverse candele di fronte a una parete con un foro e guarda dalla parte di là sopra uno schermo e vi vede tante figure quante sono le candele, disposte lungo linee che si incrociano nel foro; e se sopprime una candela, scompare anche la figura corrispondente, e se ritorna la candela, ritorna anche la figura al suo posto. Per descrivere completamente l'esperienza della « camera oscura » non ci manca che l'osservazione che ciascuna figura è capovolta [19].

Però Alhazen non attribuisce nessuna importanza geometrica a questa esperienza, e la considera soltanto in relazione alla sua tesi: cioè ne deduce che se le varie luci si mescolassero nell'aria, dopo non si dovrebbero rivedere le figure delle candele [20].

Egli conclude che la luce segue le sue traiettorie rettilinee, senza temere intersecazioni con altre luci nei corpi diafani. A questo punto sorge un caso interessante.

Alhazen pone questa esperienza nel primo Libro, che è quello dedicato al meccanismo della visione; mette in evidenza [21] che le

[18] « Corpora perspicua nata atque apta sunt ad recipiendum reddendumque objectis corporibus lucem et colorem, absque ulla sui mutatione ».

[19] « Et significatio quod luces et colores non permisceantur in aere, neque in corporibus diaphanis; est, quod quando in uno loco fuerint multae candelae in locis diversis et distinctis, et fuerint omnes oppositae uni foramini pertranseunti ad locum obscurum, et fuerit in oppositione illius foraminis in obscuro loco paries, aut corpus non diaphanum: luces illarum candelarum apparent super corpus vel super illum parietem, distinctae secundum numerum candelarum illarum: et quaelibet illarum apparet opposita uni candelae secundum lineam transeuntem per foramen; et si cooperiatur una candela, destruetur lux opposita uni candelae tantum: et si auferatur coopertorium, reverteretur lux ».

[20] « Et hoc poterit omni hora probari: quod si luces admiscerentur cum aere, admiscerentur cum aere foraminis, et deberent transire admixtae et non distinguerentur postea. Et nos non invenimus ita ».

[21] « Et quod diximus de luce, et colore, et aere, intelligendum est de omnibus corporibus diaphanis, et *tunicis visus diaphanis* ».

tuniche dell'occhio in particolare vi si associano, e poche righe più sotto è costretto a fare quell'eccezione che abbiamo detto a proposito della prima superficie del cristallino!

Il cristallino, perché è sensibile, perché può soffrire per colpa della luce, è un corpo trasparente eccezionale! « Humor crystallinus lucem et colorem aliter recipit, quam coetera corpora ».

È rimarchevole il fatto che queste conclusioni siano immediatamente consecutive all'esperienza della camera oscura, perché sarà proprio questa stessa esperienza, cinque o sei secoli più tardi, a procurare il balzo definitivo per la spiegazione del meccanismo della visione.

Torniamo alla « luce » di Alhazen. Se i corpi diafani non la alterano, i corpi « densi », ossia opachi, producono effetti ben più complessi. Essi ricevono la luce delle sorgenti, come il sole, il giorno, il fuoco, le candele, etc., e la rimandano in tutte le direzioni. Fra l'altro è da notare a questo riguardo che il colore dei corpi illuminati cambia al cambiare della luce che li illumina. Si presenta allora l'obbiezione: perché quando si guarda un corpo antistante all'occhio, si vedono le forme e i colori di questo corpo e non si vedono quelli dell'altro corpo che lo illumina? Alhazen dà un'altra prova della sua perspicacia. Egli nota che le forme sono tanto più deboli quanto più si allontanano dall'oggetto che le ha originate; perciò è vero che chi guarda un oggetto illuminato deve ricevere le forme e i colori di questo e della sorgente, ma il prevalere dell'uno o dell'altro gruppo è una questione d'intensità, tenuto conto che la sorgente di luce deve per forza di cose trovarsi più lontana dall'occhio, per così dire, che non l'oggetto osservato.

E a questo proposito ripete sotto altra forma l'esperienza della camera oscura: interpone una parete con un foro tra un corpo illuminato con una luce qualunque e un altro corpo bianco posto in un ambiente oscuro: cioè fa una camera oscura contenente un corpo bianco di fronte al foro. Ebbene, egli osserva su questa specie di schermo bianco la luce proveniente dal corpo esterno alla camera.

Tuttavia nel complesso delle considerazioni di Alhazen, per quanto sia evidente lo spirito di innovazione e lo sforzo inteso a inquadrare i fenomeni studiati sperimentalmente, si nota ancora un'influenza discreta del vecchio modo di ragionare e specialmente delle teorie della scuola atomistica. La distinzione persistente fra luce e colore, il riportarsi a una « forma prima » che parte dalla sorgente e va sul corpo illuminato, e a una « forma seconda » che

si diparte da questo per entrare nell'occhio, risente ancora delle « èidola », per quanto sminuzzate, purificate e articolate. Il passato non si distrugge tanto facilmente.

Accanto a questo, dobbiamo invece notare alcuni spunti, che hanno avuto un seguito notevole nel futuro; anzi è pochissimo noto che già nel mille d. C. certe idee fossero state avanzate. Si tratta del parallelo tra la luce e i proiettili meccanici.

Nel IV Libro della sua opera Alhazen studia la riflessione sopra gli specchi piani, concavi, convessi, sferici, cilindrici, conici, etc., studia la formazione delle immagini e le curiosità che ne seguono; ma su questo dobbiamo passar sopra. Naturalmente si appoggia alla legge della riflessione di Euclide, sia pure mettendo bene in evidenza che i raggi vanno considerati non emessi, ma ricevuti dall'occhio. Però egli vuol dare una dimostrazione *naturale* della legge della riflessione, riportandosi a un parallelo *meccanico*. Ecco il testo:

La ragione per cui la luce si riflette facendo con lo specchio un angolo uguale a quello sotto cui vi arriva è la seguente. Siccome la luce si muove di moto velocissimo, e quando cade sullo specchio non viene ammessa nell'interno, ma le viene negato di fermarvisi, e siccome in essa permane ancora la forza e la natura del moto primitivo, si riflette dalla parte da cui arrivò, e secondo una linea inclinata come la precedente.

Non si direbbe un ragionamento di mille anni fa!

E continua:

Possiamo trovare delle cose simili a questa nei moti naturali e anche in quelli artificiali. Se lasciamo cadere un corpo sferico pesante da una certa altezza sopra un corpo spianato, lo vediamo riflettersi secondo quella perpendicolare per cui era disceso. Nel movimento artificiale, avviene altrettanto. Si fissi uno specchio a una parete all'altezza d'un uomo, si aggiusti un corpo sferico in cima a una saetta, e si lanci la saetta con un arco, da un'altezza uguale a quella dello specchio, normalmente a questo; la si vedrà tornare indietro, secondo la stessa perpendicolare. Se per altro la saetta sarà inclinata di un certo angolo sull'orizzonte, la si vedrà riflettersi non per la linea per cui era venuta, ma secondo una direzione simmetrica della prima rispetto alla normale allo specchio [22].

[22] « Quare autem fiat reflexio lucis secundum lineam eiusdem situs cum linea, per qua accedit ad speculum ipsa lux: est: Quoniam lux motu citissimo movetur et quando cadit in speculum non recipitur; sed ei fixio in corpore illo negatur: et cum in ea perseveret adhuc prioris motus vis et natura, reflectitur

Alhazen continua spiegando questo comportamento con la scomposizione del moto nelle componenti normale e parallela al piano dello specchio e con l'inversione della prima nella riflessione, mentre la seconda rimane invariata. Egli fa il ragionamento per il corpo pesante; però aggiunge: « La luce poi avendo la stessa natura di riflettersi, mentre non ha la proprietà di salire o di scendere, si muove nella riflessione secondo la linea retta per cui ha cominciato, fino a che incontra l'ostacolo che faccia fermare il movimento ». E conclude: « E questa è la causa della riflessione » [23].

Interessante ancora è la parte che riguarda la rifrazione. Anche a proposito di questa Alhazen scompone il moto in due componenti, una normale e una parallela alla superficie trasparente, e mentre lascia inalterata la seconda, considera accelerata o ritardata la prima. E ciò su confronto con esempi meccanici di questo tipo: se uno lancia una palla di ferro contro una tavoletta sottile, in modo da perforarla, vede la traiettoria del proiettile, dopo la perforazione, avvicinata alla normale. Oppure se uno prova a tagliare un'asta di legno obliquamente con una spada, osserva un fenomeno analogo.

Oltre all'interesse del parallelo, è notevole anche il ragionamento fatto per giustificare la variazione nella componente normale del moto: « le luci che si propagano per i corpi trasparenti, si propagano con moto veloce, inapprezzabile a causa della sua velocità. Pertanto il loro moto nei corpi sottili, cioè in quelli che sono diafani, è più veloce del loro moto in quelli più grossolani, cioè che sono meno diafani. Infatti ogni corpo diafano, quando la luce lo attra-

ad partem a qua processit, et secundum lineas eumdem situm cum prioribus habentes.

« Huius autem rei simile in naturalibus motibus videre possumus, et etiam in accidentalibus. Si corpus sphaericum ponderosum ab aliqua altitudine descendere permittamus perpendiculariter super politum corpus: videbimus ipsum super perpendicularem reflecti, per qua descenderat. In accidentali motu. Si elevetur aliquod speculum secundum aliquam altitudinem hominis, et firmiter in pariete figatur, et in acumine sagittae consolidetur corpus sphaericum; et proijciatur sagitta per arcum in speculum, hoc modo, ut elevatio sagittae sit aequalis elevationi speculi, et sit sagitta aequidistans horizonti: planum quod super perpendicularem accedit sagitta ad speculum, et videbitur super eandem perpendicularem eius regressam. Si vero motus sagittae fuerit super lineam declinatam in ipsum, videbitur reflecti non per lineam per quam venerat, sed per lineam aequidistantem horizonti, sicut et alia erat, et eiusdem situs, respectu speculi cum ea, et respectu perpendicularis in speculo ».

[23] « Lux autem habens eandem reflectendi naturam, cum ei naturale non sit ascendere aut descendere, movetur in reflexione secundum lineam incoeptam usque ad obstaculum, quod sistere faciat motum. Et haec est causa reflexionis ».

versa, le oppone una piccola resistenza, a seconda della sua grossolanità »[24].

A parte il fatto che le cose vanno un po' a rovescio, come vedremo in seguito, perché quando la componente normale viene frenata, il raggio si allontana dalla normale, invece di avvicinarvisi, si sente in questa « luce » di Alhazen qualche cosa che si suole attribuire a epoche più recenti.

Per spiegarci come mai delle idee così nuove, così bene inquadrate, così bene appoggiate a elementi sperimentali, siano rimaste per tanto tempo senza seguito, bisogna proprio fare appello alla circostanza che Alhazen visse nel mondo arabo, in tempi in cui il mondo occidentale era in condizioni quanto mai depresse. Vedremo fra breve quali ostacoli di ordine filosofico resero difficile la penetrazione di queste nuove idee in Occidente, anche nei primi secoli dopo il mille.

Esiste un trattato di ottica di un certo Vitellone o Vitellione o Witelio, non molto ben definito, oriundo polacco, ma che nel 1271 si trovava in Italia a Viterbo. Questo trattato, che è stato molto studiato nel Medio Evo, dapprima in varie edizioni manoscritte e infine stampato nel 1533, per quanto si presenti dal punto di vista formale e matematico assai più ordinato e conseguente, dal punto di vista fisico riporta solo le idee, le dimostrazioni e le esperienze di Alhazen, pur senza citarne la fonte.

Quando, nel 1572 come si è detto sopra, Federico Risner tradusse il testo originale arabo dell'Alhazen (e nella prefazione assicura di non aver modificato nulla, salvo migliorare l'ordine dell'esposizione e la suddivisione in sette Libri) lo fece seguire dai *Opticae Libri X* del Vitellione, e tanto nella prima, quanto nella seconda opera ad ogni proposizione fece seguire i richiami utili a dimostrare da quali brani dell'Alhazen il Vitellione aveva tratto le sue dimostrazioni.

Così con grande lentezza le idee della scuola araba, a sfondo spiccatamente fisiologico, con indirizzo decisamente fisico, ma colla dovuta considerazione anche dell'intervento psicologico, nel com-

[24] « Luces ergo, quae extenduntur per corpora diaphana, extenduntur motu veloci, qui non patet sensui propter suam velocitatem. Praeterea motus earum in subtilibus corporibus, scilicet in illis, quae valde sunt diaphana, velocior est motu earum in iis, quae sunt grossiora illis, scilicet quae minus sunt diaphana. Omne enim corpus diaphanum, cum lux transit in ipsum, resistit luci aliquantulum, secundum quod habet de grossitie ».

plesso fenomeno della visione, si diffusero anche in Occidente e cominciarono a produrre i loro effetti nei centri culturali che nel frattempo stavano riprendendo quota.

Come nel periodo ellenico, i fautori della teoria delle scorze, a carattere decisamente fisico-fisiologico, rappresentavano una esigua minoranza di fronte ai sostenitori della teoria dei raggi visuali, a carattere prevalentemente matematico, anche ora, verso il 1000 d. C., i seguaci delle idee della scuola araba di carattere fisico-fisiologico costituivano una minoranza molto ristretta di fronte a una nuova potente schiera di filosofi.

Si può dire che a questo punto la minoranza fisica del passato aveva sfondato lo sbarramento dei matematici, nonostante la loro predominanza numerica, e li aveva confinati negli studi di carattere astratto dell'ottica geometrica, e anche in quelli della prospettiva. Ma appena superato questo sbarramento, la minoranza fisica si trovò ad urtare contro un altro sbarramento, non meno potente di quello già superato.

E non soltanto in Occidente. Si stava per entrare in quel periodo storico in cui la cultura in Occidente riprendeva quota, e si rispolveravano i manoscritti e i palinsesti delle opere classiche, se ne curava la traduzione e la diffusione. È noto che ciò avveniva prevalentemente nell'ambiente ecclesiastico, e in qualche « Studio », come quelli di Bologna, di Parigi, di Montpellier, che per altro erano più o meno apertamente controllati dalle autorità politiche e religiose. Ma indipendentemente dalle direttive e dalle influenze esterne, era naturale e inevitabile che agli studiosi che si avvicinavano a un corpo di dottrina così elevato e ricco come quello grecoromano, questo dovesse apparire anche più grandioso e ammirevole di quello che era veramente. Non c'è dunque da meravigliarsi, se, per un processo molto naturale e spontaneo, si istaurasse una specie di dogmatismo: la « tradizione » e « l'autorità dei maestri » erano argomenti superiori ad ogni altro, anche sostenuto dalla massima evidenza sperimentale. D'altra parte, data la natura dei regimi politici del tempo, questa mentalità era largamente favorita anche dalle ingerenze esterne che controllavano l'ambiente della cultura. È noto che in quei tempi di fronte a un fenomeno qualsiasi, invece di studiarne il decorso mediante osservazioni e esperimenti, se ne cercava la spiegazione nei testi classici. L'insegnamento elevato, la forma-

zione delle nuove leve di docenti consisteva nell'insegnare loro a interpretare e a comprendere i testi classici e « insuperabili ».

È dunque ben naturale che in un ambiente dominato da una mentalità di questo genere, conservatrice all'eccesso, e paralizzata dall'ammirazione sincera per la grandiosità della sapienza antica, gli sperimentatori, i fisici rappresentassero una specie di rivoluzionarii, fossero quindi boicottati dai dirigenti dei centri culturali. Era inevitabile che ben pochi si sentissero di affrontare una situazione così difficile e così costosa; perché anche a quei tempi alle direttive ideologiche che uno dimostrava erano subordinate le possibilità di carriera.

Anche in Oriente. A parte la scuola medica araba, che era difesa dalle necessità molto pratiche e molto importanti della cura delle malattie, non è da credere che l'ambiente scientifico fosse dominato da personalità come Alkindi e Alhazen. Ben più famoso e seguito dell'Alhazen è stato il suo contemporaneo, quasi coetaneo Abu Alì Hosayn ibn Abdillah ibn Sina, conosciuto in Occidente col nome di Avicenna [25]. Fu una delle persone più note della filosofia medioevale, ed ebbe un'influenza grandissima anche in Occidente. Di tutta la sua vastissima produzione, per la nostra storia interessa specialmente il *De anima* o *Liber sextus naturalium*. Egli studiò a fondo il problema della conoscenza del mondo esterno, e quindi in modo particolare il meccanismo sensitivo e più particolarmente ancora il funzionamento della visione. Ma le sue idee erano indirizzate per una via del tutto diversa da quella su cui procedeva l'Alhazen; mentre questi, pur riconoscendo esplicitamente che nella visione vi era un intervento determinante della psiche dell'osservatore, a cui spettava la funzione conclusiva del processo totale, riconosceva anche che la prima fase era fisica, e che vi era poi una fase intermedia, di natura fisiologica (per parlare in termini moderni) e si era dedicato alla ricerca di definire il meglio possibile la struttura dello stimolo fisico e il decorso dell'intervento fisiologico, l'Avicenna minimizza del tutto la parte fisico-fisiologica, e concentra tutta l'attenzione sull'attività psichica dell'osservatore; attività che egli considera essenziale e determinante, mentre considera occasionale e priva di importanza la parte sensoriale. Da qui a mettere in dubbio anche l'esistenza stessa del mondo materiale il passo era molto breve.

[25] Avicenna, persiano, visse fra il 980 e il 1037 d. C. Era dunque più giovane di Alhazen appena di 15 anni.

Avicenna quindi si schiera contro il materialismo, e anche contro l'idea che i raggi capaci di impressionare l'occhio, secondo Alkindi e Alhazen, avessero una natura materiale. Egli riprende in considerazione l'emissione dei simulacri dai corpi, ma li smaterializza al massimo, e finisce col chiamarli « forme » o anche « specie ».

Le idee di Avicenna trovarono in Occidente un'accoglienza ben più favorevole di quelle dei materialisti. Avicenna fu considerato uno dei grandi « maestri ». Il suo indirizzo incontrava nella mentalità filosofica occidentale una vera risonanza. Difatti numerosi dotti occidentali affrontarono il problema della visione, e su tutti si sente spiccatissimo l'influsso avicenniano.

Undici anni prima della morte di Avicenna nacque Averroé[26], altro filosofo notissimo, che pure ha avuto molta influenza nel mondo occidentale. È noto che egli prese una posizione contraria a quella del predecessore ed incontrò una fortissima opposizione da parte degli ambienti ufficiali, anche nel mondo islamico, fino al punto che i suoi scritti furono bruciati per decreto reale. Particolare, questo, che dimostra come acre e profondamente sentita fosse la polemica sulle idee filosofiche fondamentali. Ora, interessa rilevare, per la nostra storia, soltanto che Averroé contrastò apertamente le idee così soggettive dell'Avicenna, circa il meccanismo della visione, ma sempre si mantenne sul piano filosofico, senza « scendere » al livello degli studi fisico-fisiologici del tipo di quelli di cui l'Alhazen ormai era il rappresentante più quotato.

Sintetizzando la situazione delle idee circa la luce, in questi ultimi secoli del Medio Evo, si può dire che la discussione e l'indagine si era come concentrata in tre ambienti; quello matematico, quello fisico, e quello filosofico. Il primo aveva perso molta importanza e si dedicava a studi puramente astratti, a carattere specialmente geometrico e prospettico. Gli altri due ambienti si contendevano il primato nell'importanza delle loro idee. In sostanza si stava definendo una divisione anche nella nomenclatura, oltre che nell'indirizzo. I seguaci dell'indirizzo fisico insistevano nel sostenere l'esistenza di un agente esterno capace di stimolare il sensorio ocu-

[26] Averroé, per quanto nato a Cordova in Spagna, fa parte del mondo culturale islamico. Il suo nome completo è Abul-Walid Mohammed ibn Ahmad ibn Mohammed ibn Roshd. Nato nel 1126, morì nel 1198.

lare, e finirono con l'adottare, per indicare precisamente questo agente, il termine *lumen*; i seguaci dell'indirizzo avicenniano invece, minimizzando l'importanza del *lumen*, concentrarono tutto il loro interesse sulla rappresentazione psichica, sul « chiarore » che l'osservatore vede quando dice che non è al buio, e per indicare questa entità fu adottato chiaramente il termine *lux*. Però, non sempre fu messo esplicitamente in chiaro che la *lux* era una entità psichica, soggettiva, esistente soltanto nella mente dell'osservatore, insieme al colore, ma, senza impegnarsi per niente al riguardo, si considerò la *lux* addirittura come esistente alla superficie dei corpi, come la loro forma. E come la forma, secondo le idee classiche, si rendeva palese all'osservatore mediante i simulacri, ora detti più frequentemente « specie », come si è detto sopra, così si impose l'idea che la *lux* si rendesse palese all'osservatore mediante il *lumen*; ossia il *lumen* fu considerato come la specie della *lux* [27].

Così, mentre da una parte i fisici si dedicavano specialmente allo studio del *lumen* e tendevano per la maggior parte ad attribuirgli una natura materiale, in base ai canoni delle dottrine atomistiche, dall'altra i filosofi si dedicarono alla definizione della natura della *lux*, con un complesso di considerazioni che si possono chiamare addirittura « metafisica della luce », con incursioni anche nel campo teologico.

Siccome la massima parte delle opere su questo argomento furono scritte nel latino scientifico medievale, ebbero il titolo di *perspectiva*, in cui bisogna rilevare il significato di « scienza della visione », come traduzione del termine di « ottica » usato dai greci per lo stesso scopo, naturalmente facendo uso della radice della loro lingua che si riferisce al « vedere ». La *perspectiva* medievale ha soltanto una lontana parentela con la « prospettiva » di oggi, che ne è un derivato in un ramo molto laterale. La prospettiva odierna è legata piuttosto all'antica teoria dei matematici greci, cioè a quella dei raggi visuali.

[27] Nel tracciare l'evoluzione delle idee medioevali a proposito della luce è stata conservata la terminologia latina, perché occorre andare molto cauti nel tradurre questi termini nelle lingue moderne. Nell'italiano scientifico medievale *lumen* e *lux* furono tradotti proprio *lume* e *luce*, proprio col significato preciso dei termini latini corrispondenti. In questo senso le due parole si trovano adoperate da Dante, da Leonardo, da Galileo e da tutti gli scrittori in volgare di cose scientifiche fino al XVII secolo. L'argomento verrà ripreso a suo tempo. Per esporre il più fedelmente possibile le idee degli studiosi di cui ci occuperemo, è necessario utilizzare le due parole *lume* e *luce*, per quanto il loro significato odierno sia ben diverso.

Gli esponenti della *perspectiva* medievale fiorirono nel XIII e nel XIV secolo. Il primo fu Roberto Grossatesta [28] seguito ben presto dai famosi Ruggero Bacone [29], Giovanni Peckham [30], San Bonaventura [31] e San Tommaso d'Aquino [32], tutti non solo contemporanei, ma quasi coetanei.

Un altro maestro francescano del secolo XIII fu Bartolommeo da Bologna, di poco successivo ai precedenti.

Di Roberto Grossatesta è particolarmente interessante il trattato che porta il titolo *De iride seu de iride et speculo*, di cui due manoscritti si trovano fra l'altro nella Biblioteca nazionale di Firenze. Ruggero Bacone tratta l'argomento della natura della luce e anche altre questioni di ottica nella V parte dell'*Opus maius*, ben noto. Giovanni Peckham scrisse i *Perspectivae Communis Libri tres*, che nonostante le sue dimensioni molto modeste, fu uno dei testi più diffusi nel corso del tardo Medio Evo. San Bonaventura tratta della visione specialmente nel II Libro del *Commentarium in quattuor libros sententiarum*; San Tommaso d'Aquino ne parla in varie parti della sua vastissima produzione letteraria. Bartolommeo da Bologna scrisse un *Tractatus de luce*. E non fu questa soltanto la letteratura sull'argomento nel corso del XIII secolo. La citiamo soltanto per dimostrare quale interesse venisse dedicato al problema della visione in quel periodo.

È interessante anche rilevare che tutti questi autori (e sono senza dubbio i principali) erano ecclesiastici, e ricoprivano alte cariche nella gerarchia della Chiesa; ben due di essi sono saliti agli onori degli altari. Non è il caso di esaminare nei particolari le differenze fra le loro vedute, tanto più che le loro discussioni avevano più un carattere metafisico e gnoseologico, che scientifico e tecnico. I primi risentono fortemente l'influenza dei predecessori, e in particolare di Sant'Agostino e di Avicenna; però mentre in un primo tempo l'indirizzo teologico aveva preso il sopravvento fino al punto che si tendeva a identificare la *lux* con Dio stesso, poi si passò a considerarla una emanazione divina, e infine si arrivò anche a discutere se era una entità spirituale o materiale. Il linguaggio è assai

[28] Roberto Grossatesta visse tra il 1175 e il 1253. Fu vescovo di Lincoln.

[29] Roger Bacon nacque nel 1214 e morì nel 1294.

[30] Joannes Peckham visse tra il 1220 e il 1292; fu arcivescovo cantauriense.

[31] San Bonaventura nacque nel 1221 a Bagnoregio (Viterbo) e morì nel 1274. Fu cardinale e dottore della Chiesa.

[32] San Tommaso d'Aquino nacque nel 1227 e morì nel 1274.

difficile, perché i termini usati naturalmente erano quelli della filosofia del tempo. Complicata era la definizione di raggio, di specie, di forma; complessa e non sempre ben comprensibile l'esposizione della teoria della conoscenza di cui la visione veniva considerata un caso particolare, sia pure particolarmente importante. In tutti gli autori le direttive dell'Avicenna trovavano piena rispondenza e adesione, sia pure con la tendenza progressiva ad attenuare l'ingerenza dell'intuito e dell'intervento razionale, per tener conto dell'apporto della conoscenza sensibile.

Così si delineò lo schema della visione come collaborazione fra l'azione esercitata dalle specie sull'occhio e la capacità ricettiva della psiche dell'osservatore, sempre però con predominanza di quest'ultima. Sulla natura delle specie si accese una discussione vivacissima fra coloro che erano disposti ad assegnar loro una struttura materiale, sia pure straordinariamente fine e coloro che le volevano entità puramente « intenzionali », cioè spirituali. Si parlava anche di « raggi », ma senza avvicinarsi mai al concetto dell'Alkindi e dell'Alhazen; spesso si consideravano sinonimi di specie; però i « raggi visuali » di buona memoria erano praticamente abbandonati nelle discussioni filosofiche, anche se qualche volta veniva fatto accenno alla piramide prospettica.

Per quanto anche Roger Bacon nelle linee generali aderisse a questo indirizzo, tuttavia nella sua opera si nota un tentativo di valorizzare l'attività sperimentale, e da questo punto di vista sono degne di menzione le esperienze da lui eseguite e descritte nel campo della riflessione e anche della rifrazione del *lumen*; si può dire che fra tutti i personaggi di questa categoria egli è quello che si accosta di più all'indirizzo dell'Alhazen.

Per concludere questo rapido riassunto delle idee della *perspectiva* del XIII secolo, riporteremo un brano preso dal Capitolo IX del III Trattato del *Convivio* di Dante Alighieri [33]:

... Dove è da sapere che propriamente è visibile il colore e la luce, siccome Aristotele vuole nel secondo *dell'Anima* e nel libro di *Senso e Sensato*. Ben è altra cosa visibile; ma non propriamente, perocché altro senso sente quello, sicché non si può dire che sia propriamente visibile, né propriamente tangibile; siccom'è la *figura*, la *grandezza*, il *numero*, lo *movimento*, e lo *star fermo*; che sensibili comuni si chiamano; le quali cose con più sensi comprendiamo. Ma il colore e la luce sono propria-

[33] Dante Alighieri nacque a Firenze nel 1265 e morì a Ravenna nel 1321.

mente *visibili*, perché solo col viso li comprendiamo, cioè non con altro senso. Queste cose visibili, sì le proprie, come le comuni, in quanto sono visibili vengono dentro all'occhio — non dico le *cose*, ma le *forme* loro — per lo mezzo diafano, non realmente, ma intenzionalmente, siccome quasi in vetro trasparente. E nell'acqua ch'è nella pupilla dell'occhio, questo discorso, che fa la forma visibile per lo mezzo suo, si compie, perché quell'acqua è terminata quasi come specchio, che è vetro terminato con piombo; sicché passar più oltre non può, ma quivi, a modo d'una palla percossa, si ferma. Sicché la forma che nel mezzo trasparente non pare, lucida è terminata; e questo è quello per che nel vetro piombato la immagine appare, e non in altro. Da questa pupilla lo spirito visivo, che si continua da essa alla parte del cerebro dinanzi, dov'è la sensibile virtù siccome in principio frontale, subitamente senza tempo la rappresenta, e così vedremo. Per che, acciocché la sua visione sia verace, cioè cotale qual'è la cosa visibile in se, conviene che il mezzo per lo quale all'occhio viene la forma sia senza ogni colore, e l'acqua della pupilla similmente; altrimenti si macolerebbe la forma visibile del colore del mezzo e di quello della pupilla. E però coloro che voglion far parere le cose nello specchio d'alcuno colore, interpongono di quel colore tra 'l vetro e 'l piombo, sicché il vetro ne rimane compreso. Veramente Plato e altri filosofi dissero che 'l nostro vedere non era perché il visibile venisse all'occhio, ma perché la virtù visiva andava fuori al visibile. E questa opinione è riprovata per falsa dal Filosofo (Aristotele) in quello di *Senso e Sensato* [34].

Questo brano non sarà più tanto ermetico, dopo i chiarimenti dati nelle pagine precedenti; però esso costituisce un campione che indica bene il modo di ragionare dei dotti del suo tempo.

Passando al XIV secolo si nota una evoluzione lenta, ma continua nel senso che le disquisizioni metafisiche e filosofiche sulla natura della *lux* tendono a cristallizzarsi (passando così in quelle regole classiche che venivano inserite nei testi classici e diventavano gli insegnamenti dei « grandi maestri » e non per niente comparivano fra gli autori due autorevoli dottori della Chiesa, come San Bonaventura e San Tommaso d'Aquino) e quindi non subiscono più sviluppi degni di nota; invece spunta una nuova generazione di studiosi che tende ad avvicinarsi ad una *perspectiva* più geometrica, come se l'influsso dell'Alhazen cominciasse a dare i suoi frutti.

Uno degli esponenti di questo nuovo indirizzo è stato Giovanni Buridano, autorevolissimo docente dell'Università di Parigi [35]. Eser-

[34] Dante Alighieri, *Il Convivio*, G. Barbera Editore, Firenze 1928.
[35] Giovanni Buridano fu rettore della Facoltà dello Studio di Parigi nel 1328 e nel 1340.

citò una grande influenza sull'ambiente filosofico del suo tempo. Ebbe una larga produzione scientifica, e in particolare nella sua opera *De anima* studia la conoscenza del mondo esterno, con un indirizzo progressista; il tono principale delle idee di Buridano consiste nel negare una gerarchia di conoscenze, a cui avevano data tanta importanza i filosofi del XIII secolo. Per Buridano la conoscenza intellettiva e quella sensoriale dovevano esser portate sullo stesso piano. Ciò aveva significato e valore soprattutto per gli sviluppi futuri, in quanto cominciava così quel movimento che portava a concentrare l'interesse sul meccanismo sensoriale, distraendolo da quello psichico. Movimento che da allora in poi si è andato sempre più accentuando. In base alle idee esposte nelle pagine precedenti, la *lux*, la luce psichica, perdeva quota, mentre ne acquistava il *lumen*, il lume fisico, che fino ad allora era stato appena considerato. Ora erano già sullo stesso piano.

Su questa via si pose anche Guglielmo da Ockham [36], che dedicò molto studio al problema della visione nell'opera *In quatuor libros sententiarum*; e ancora l'argomento fu trattato da Hervé de Nédéllac, o Natalis, nell'opera *Quattuor Quodlibeta* [37]. Sono trattazioni fatte sempre a base di specie, ma in ciascuna vi è qualche sfumatura nuova, che denota un movimento lentissimo ma continuo nello stesso senso: cioè verso la valorizzazione del processo fisico-fisiologico nella conoscenza in generale e nella visione in particolare.

Ancora un passo avanti in questo senso si nota nel *De visione stellarum* di Nicola Oresme, in cui viene sviluppata come mai era stato fatto prima la geometria delle osservazioni astronomiche, tenendo conto particolarmente della rifrazione atmosferica [38].

La geometrizzazione dello studio dei fenomeni ottici si va sviluppando nelle opere di altri studiosi, come nelle *Quaestiones perspectivae* di Domenico da Chivasso, in quelle, con lo stesso titolo, di Enrico d'Assia o di Langenstein [39] e più ancora in quelle di Biagio Pelacani da Parma.

Questi nomi non sono molto noti. Le loro opere sono state

[36] Guglielmo nacque ad Ockham verso la fine del XIII secolo. Studiò ad Oxford. Morì nel 1347.

[37] Hervé de Nédéllac fu generale dell'ordine domenicano nel 1318.

[38] Nicola Oresme, vescovo di Lisieux, morì nel 1382.

[39] Enrico d'Assia o di Langenstein studiò a Parigi alla scuola di Oresme, di cui divenne collega; nato nel 1325, passò a insegnare teologia a Vienna dal 1382 al 1384, morì nel 1397.

riesumate in manoscritti sepolti in varie biblioteche [40]; cioè al loro tempo non fu possibile pubblicarli per le stampe; e neppure in tempi immediatamente posteriori. Le idee esposte in questi manoscritti erano dunque sgradite ai fautori della cultura dominante. Ancora una volta in seno a un ambiente conservatore e attentamente controllato sorgevano delle idee d'avanguardia, da cui dovevano scaturire quelle che in un futuro non lontano si sarebbero imposte e avrebbero cambiato radicalmente le idee di fondo a proposito della visione e della luce. Ma questo risultato fu raggiunto dopo ancora un paio di secoli: le idee nuove non erano incoraggiate: era anzi loro impedito di essere conosciute e divulgate. Restavano, se pure vi restavano, sepolte in qualche manoscritto, nel fondo delle biblioteche.

Perciò non è inutile dare ancora qualche informazione circa le idee dominanti nel XV secolo.

Una documentazione degna di qualche rilievo si trova in una specie di enciclopedia scritta da Gregorio Reisch, priore di una certosa presso Friburgo [41]. L'opera conosciuta col nome abbreviato di *Margarita philosophica* ebbe larga diffusione e ne furono fatte ben quattordici edizioni tra il 1486 e il 1583; la prima portava il titolo: *Epitome omnis philosophiae, alias margarita philosophica, tractans de omni genere scibili.*

Vi si tratta anche della natura della luce, ma in modo assai strano, tanto più che sono citati Alhazen, Bacone e Vitellione. Vi si torna a parlare di *immagini*, quasi nel senso usato da Lucrezio, sia pure con ritocchi e modificazioni concettuali di una certa importanza. Così viene riportata l'opinione che l'immagine non venga prodotta tutta quanta dall'oggetto, immediatamente, ma che l'immagine prodotta dall'oggetto nelle immediate vicinanze, nel mezzo circostante, ne produca un'altra in una regione subito contigua, e questa una terza, e così via fino a raggiungere l'occhio; a meno che, dato che ogni immagine è più debole della precedente, nel frattempo non si estingua per via. Tutto ciò avverrebbe in un tempo diverso da zero, anche se impercettibilmente breve. Queste figure avrebbero un'essenza spirituale e immateriale: esse potrebbero attraversarsi e intersecarsi mutuamente nei mezzi trasparenti, senza disturbarsi.

[40] Cfr. G. Federici Vescovini, *op. cit.*
[41] Visse sul finire del secolo XV.

Più oltre troviamo concetti un po' diversi:

Nei corpi visibili altro è luce in sé (lux), la luce illuminante (lumen) e il colore. La lux è una qualità naturale nei corpi luminosi d'imprimere un movimento simile a quello del corpo in cui essa è; movimento che ne è l'essenza e che non dipende da nient'altro d'intrinseco. Essa ha ricevuto l'esistenza dal Creatore, alla Creazione del Mondo, quando disse: « Fiat lux, et facta est lux ». Infatti prima della creazione dei *luminarii*, essa esplicò le funzioni del Sole, nel quale la sua natura passò nel quarto giorno... La lux è nel Sole in quanto egli è luminoso per sé stesso; negli altri corpi non c'è che per partecipazione...

Il lumen, ossia la luce illuminante, è l'immagine della luce in sé, ossia della lux, e la sua derivazione prima...

Il colore è l'estremità del corpo trasparente nel corpo limitato; cioè il colore è una qualità che risiede alla superficie di un corpo limitato e opaco, che tocca il mezzo trasparente...

L'opinione più diffusa tra i filosofi è che il colore non sia prodotto dalla luce (lux) nella sua essenza reale e materiale; ma che esista in precedenza e che sia visibile in potenza, quando non è illuminato; e venga reso visibile in atto dalla luce esterna...

Quanto all'essenza (reale e materiale) del colore, i filosofi non sono d'accordo. Alcuni pensano che la lux è l'ipostasi del colore e di tutto ciò che è visibile: essi credono che il colore non è altro che la diversità della *limitazione* della luce nel diafano o nell'opaco, come si può vedere dai colori dell'iride, degli aloni, delle penne del collo del pavone o della colomba...

Altri dicono che il colore nasce da una mescolanza varia del diafano con l'opaco, la cui illuminazione è in sé l'atto prodotto dalla luce (lux), prima ipostasi dei colori...

Qualcuno nega l'esistenza reale dei colori dell'iride e degli aloni...

E ancora altre opinioni poco diverse da queste vengono registrate, sulle quali non è il caso di insistere. Piuttosto è interessante notare che il numero dei colori era considerato limitato: *sette*, il *bianco*, il giallo, l'arancio, il rosso, il porpora, il verde, il *nero*; tutti gli altri colori possono essere ridotti a questi.

Un altro passo interessante è il seguente:

...il mezzo della vista è il corpo trasparente e permeabile, che, almeno nell'ultima parte dove è unito al colore, deve essere diafano in atto, perché è necessario che il colore sia eccitato dalla luce, per poi stimolare il senso della vista. Infatti il colore, a causa della sua materialità, non può introdursi nella vista; esso allora genera delle *specie* di sé stesso, spo-

gliate di ogni impurità materiale, e le manda all'occhio contenute nel *lumen*, ossia nell'immagine della lux, come nel loro principio...

Ancora più avanti vengono espresse idee alquanto modificate:

Noi chiamiamo raggio visuale la *specie* della cosa visibile. Non è una linea né una superficie senza profondità, ma una piramide *corporea*, la cui base è sulla cosa vista e il vertice nell'occhio che vede. Un corpo luminoso tutto intero *delimita* sempre una piramide della sua luce in un punto qualunque: ecco perché l'occhio in qualunque punto dello spazio si trovi, può vedere il corpo luminoso, ma diversamente...

E infine, più avanti:

Degli uomini di autorità rispettabile hanno detto che la visione ha luogo per emissione di uno spirito visuale che va dall'occhio alla cosa vista...

Però ce n'è altri che immaginano le specie o immagini delle cose viste e lo spirito uscente dall'occhio che si incontrano nel mezzo interposto...

Ecco perché, noi, che ci dobbiamo tenere alla scienza *più comune*, diremo che la visione ha luogo per mezzo della ricezione nell'occhio di specie delle cose visibili, mediante una piramide che ha la base sulla cosa vista e il vertice nell'occhio. In quanto allo spirito visuale, lucido e chiaro, esso discende dal cervello per i nervi fino agli occhi. Modificato dalle specie (o immagini) ritorna indietro, con una sensazione confusa. Al suo ritorno l'anima si sveglia e vedendo la superficie del suo diafano che è della più grande purezza e assolutamente incolora, tendersi similmente all'oggetto, si rivolge a quest'oggetto e lo vede allora in modo distinto...

E segue il parallelo dell'artista che modella la cera per trarne una figura definitiva.

Dalla lettura di questo capitolo della *Margarita Philosophica* appare evidente il marasma di idee che ancora al principio del 1500 regnava circa il meccanismo della visione e la natura della luce: francamente, non si riesce a individuarvi l'opinione dell'autore: il quale, dopo aver riassunto le idee delle varie scuole, alla fine dimostra che erano ancora in ballottaggio le vecchie ipotesi delle scuole greco-romane, e che l'opinione *più comune* era per le « èidola » o « specie » più o meno corporee e materiali, al tempo stesso che incorporee e immateriali. Evidentemente la ricchezza di idee e di concetti nuovi contenuta nelle opere di Alhazen e di Vitellione era

rimasta, almeno per la massima parte, incompresa e inassorbita.

Diremmo che in ciò si deve vedere più che altro un effetto delle condizioni generali dell'epoca, e ancor più un effetto dell'indirizzo filosofico dominante.

Alhazen era stato un fisico sperimentale, anche se molti degli argomenti da lui studiati oggi si trovano classificati fuori della Fisica, come è delimitata attualmente. Ma il suo indirizzo fu quello dell'uomo che interroga la Natura, che osserva e sperimenta. Nelle sue pagine si trovano descritti strumenti per studiare la riflessione e la rifrazione della luce. Poche persone potevano capirlo e seguirlo in questo indirizzo mentale, quando nell'ambiente colto prevaleva l'idea che tra un'asserzione di Aristotele e una constatazione sperimentale in contrasto con quella, la prima aveva diritto alla precedenza e al titolo di verità.

Ma il Medio Evo volgeva ormai al termine.

Una novità sensazionale, che doveva costituire il germe di un rivolgimento profondo, si ebbe sul finire del secolo XIII, in una data che gli studi più accurati hanno potuto accertare soltanto con l'incertezza di cinque anni: tra il 1280 e il 1285 [42].

Si tratta dell'applicazione delle lenti ustorie alla correzione della presbiopia. Il che può anche dirsi l'invenzione degli occhiali. Vale la pena di spendere qualche parola a questo proposito perché la sua ripercussione sullo sviluppo della scienza ottica è molto più grande di quello che sia stato creduto finora.

Chi esamina a fondo il comportamento dell'ambiente scientifico (di tutti i tempi) nei riguardi degli occhiali, gli riconosce tutta l'importanza che ha e non soltanto dal punto di vista storico.

Come è stato riferito alla fine del Capitolo precedente, una testimonianza indiscutibile di Aristofane ci fa sapere che le lenti ustorie (anche se non si indicavano con questi termini) erano in uso corrente nel 423 a. C., per accendere il fuoco, mediante la concentrazione della radiazione solare, e si vendevano nei negozi al pubblico. Su di esse l'ambiente scientifico non si azzardava a scrivere neanche una parola; quindi non soltanto l'invenzione di tale procedimento per accendere il fuoco si deve ritenere di iniziativa prettamente arti-

[42] Cfr. Edward Rosen, *The invention of eyeglasses*, « Journal of History of Medicine and Allied Sciences », XI, 1956.

gianale, ma chi tenga conto, anche in base a ciò che è stato riportato nel Capitolo precedente, delle conoscenze che si avevano circa la rifrazione, e anche circa la visione, deve arrivare alla conclusione che neanche un matematico della levatura di Euclide o un filosofo della levatura di Aristotele o di Platone, ci poteva capire qualche cosa.

In fatto di visione, l'alta filosofia era giunta a enunciare la regola generale che il senso della vista era il più infido di tutti i sensi e che si poteva credere a ciò che si vedeva soltanto quando era confermato dal tatto. Anche soltanto la riflessione su uno specchio piano portava a « visioni », di cui nessuno sapeva rendere ragione (vedremo nelle pagine seguenti, chi fu il primo a darne ragione) e nel caso delle lenti, (s'intende di quelle costruite per scopo ustorio) chi vi ha guardato attraverso ha visto figure di tutte le forme più strane, di dimensioni alterate e anche con orli colorati; cioè tutti aspetti mai confermati dal tatto; perciò è più che giustificato che tutti coloro impegnati nella conoscenza del mondo esterno guardassero le lenti come il più grosso imbroglio che fosse mai stato costruito, e le avessero ritenute indegne di entrare nella torre d'avorio della scienza.

L'uomo della strada, con la sua semplicità e la sua praticità ha trovato che con le lenti accendeva il fuoco, e perciò le comperava e le usava per tale scopo. Non aveva occasione di guardarvi attraverso, e se per caso ci guardava e vedeva figure strane, non le considerava e se ne dimenticava subito.

E così le cose sono andate avanti per almeno diciotto secoli. Ma verso il 1280 un utente di lenti ustorie ci ha guardato attraverso, o per caso, o anche semplicemente per verificare se erano pulite, o per altra ragione del genere, e si è accorto di un fenomeno nuovo. Egli era piuttosto anziano, diciamo ultra-cinquantenne; già da tempo aveva dovuto constatare che gli oggetti troppo vicini agli occhi li vedeva un po' confusi e per vederli nitidamente li doveva allontanare; ma se li riguardava, anche assai vicini agli occhi, tenendo una lente davanti agli occhi stessi, rivedeva gli oggetti nettamente come quando era giovane.

Un vero miracolo!

L'aver notato questo effetto ha voluto dire correggere per la prima volta la presbiopia mediante lenti convergenti.

Naturalmente la persona che ha capito questo, ha cercato di rendere più pratico il dispositivo, perché notoriamente le lenti ustorie, in quanto destinate ad accendere il fuoco, non possono essere

piccole come quelle per occhiali, e quindi la prima innovazione introdotta nelle lenti per essere utilizzabili come protesi oculari è stata quella di ridurne il diametro, per poterne mettere una davanti a ogni occhio, e (se le cose sono andate così) si è portati a dedurne che l'inventore, dovendo essere uno che aveva lenti a disposizione e non aveva motivi di avversità nei loro riguardi, doveva essere un maestro vetraio, proprio costruttore di lenti ustorie. Se le cose sono andate così, non ha incontrato difficoltà notevoli per procurarsi due lenti convergenti di dimensioni opportune.

Questo discorso è stato fatto, perché ci è stato suggerito dalle innumerevoli ricerche fatte per trovare qualche traccia dell'inventore e che a tutt'oggi non hanno dato alcun risultato. Ciò esclude che egli appartenesse alla classe di coloro che sapevano scrivere e che avrebbero documentato in qualche modo la mirabile novità. Circa la località dell'invenzione, vi è qualche indicazione, sommaria, ed è ancora aperta la discussione fra la valle dell'Arno e la Laguna veneta, entrambe allora rinomate per le industrie vetrarie che vi fiorivano.

Non è privo di significato l'aver introdotto nell'uso il nome di « lente », che a quel tempo era molto usato per indicare la lenticchia-legume; e già basterebbe questo nome per escludere, data la sua volgarità, che sia stato coniato da un personaggio dell'ambiente colto. Però si deve mettere bene in evidenza, che quando si voleva indicare una lente, si aveva cura di completarne il nome in « lente di vetro » o « lente cristallina », per escludere che un ascoltatore fosse portato a credere che si parlava di una lenticchia-legume.

Furono ancora gli oscuri artigiani costruttori di « lenti di vetro » ad avviare un periodo di progresso, dovuto alla costatazione che per dotare le persone di età diversa di lenti efficaci, era necessario disporne di una certa varietà e già cominciò a praticarsi una classificazione del tipo: « lenti per utenti di quarant'anni, lenti per cinquant'anni, lenti per sessant'anni »; che erano gruppi di lenti con facce sempre più curve, quanto più anziano era l'utente che le richiedeva.

Una classificazione del genere sarebbe stata compito di persone dotte, se non fosse avvenuto che quando i matematici e i filosofi sono stati informati del nuovo mirabile modo di utilizzare le lenti di vetro, essi, già informati dalle notizie dei numerosi secoli trascorsi, non avessero, senza alcuna esitazione e anche senza alcuna eccezione, confermata la condanna classica, anche perché eran troppi gli esperimenti fatti guardando attraverso le lenti *tenute lontane*

dagli occhi, in modo che si vedevano figure non confermate dal tatto, che secondo la regola classica, era necessario per prendere per buono ciò che si vede.

Questo comportamento della classe colta, nei riguardi delle lenti, anche impiegate come ordigni ustorii, e avvicinate agli occhi dei presbiti, anche se oggi è poco credibile, perché la situazione è radicalmente mutata, è confermato da una documentazione vastissima, di cui non pochi casi saranno riportati anche nel corso di questa storia. Potremmo citare il silenzio osservato nei riguardi delle lenti nel secolo XIV, durante il quale a loro proposito sono state stampate meno di una diecina di righe; nel secolo XV non si è trovata neanche una citazione, e verso la fine del secolo XVI la congiura del silenzio è cessata, in modo molto interessante, come vedremo fra breve.

Ma il fenomeno più rilevante si è avuto a proposito delle lenti divergenti. Nel corso dei tre secoli ora ricordati sono state messe in circolazione anche queste nuove lenti, notoriamente (oggi) necessarie per correggere la miopia. *Circa la loro invenzione non è stata stampata neanche una parola*: non si sa assolutamente nulla circa il tempo in cui sono state introdotte nell'uso, né da chi, né in quale parte del mondo. È fin troppo evidente che sono state trovate da degli occhialai, come quelli che avevano trovato che erano necessarie lenti a facce sempre più *colme*, quanto più anziana era la persona che le richiedeva; essi avranno certamente costatato che provando a correggere i miopi (che allora, non avendo alcuna idea circa la causa della loro ametropia, venivano indicati come coloro che avevano la « vista debole ») con lenti convergenti, ne sentivano tanto più « danno », quanto più colme erano le loro facce; e qualche artigiano molto perspicace avrà pensato che lenti *a facce cave* avrebbero dato buoni risultati e la prova all'atto pratico gli avrà dimostrato che aveva ragionato bene; e così sono nati i « vetri cavi », che non potevano meritare il nome di « lenti », perché non sono mai esistite lenticchie a facce concave. Non solo, ma nessuno, in passato ha mai neppure posto il problema di quando, dove e da chi fossero state introdotte le lenti negative; e perciò il silenzio assoluto con cui è stata lasciata passare un'invenzione così importante, che ha potenziato milioni di persone, non è stato mai condannato come avrebbe meritato, perché nessuno ha mai saputo come si sono svolti i fatti a tale riguardo.

L'argomento è stato portato alla ribalta da noi verso gli anni

Quaranta; e nel corso delle nostre ricerche di documenti dell'epoca dai quali risultassero esistenti delle lenti divergenti, il più remoto che abbiamo trovato è stato un cenno in un'opera dal titolo: *La pratica della prospettiva* dell'architetto Daniele Barbaro [43]. Egli include fra i « Modi naturali di mettere in prospettiva » anche *la camera oscura*, che già era stata proposta per tale scopo da Leonardo da Vinci, ma egli precisa: « Ma per ora io toccherò una bellissima isperienza d'intorno alla Perspettiva. Se vuoi vedere come la natura pone le cose digradate né solamente quanto a i contorni del tutto e delle parti, ma quanto i colori, e le ombre, e le simiglianze, farai un buco nello scuro d'una finestra di dove vuoi vedere, tanto grande quanto è il vetro d'un occhiale. E piglia un occhiale da vecchio, cioè che abbia alquanto di corpo nel mezzo, e non sia concavo, come gli occhiali da giovani che hanno la vista corta, e incassa questo vetro nel buco assaggiato... ».

Ma dopo ben trentacinque anni Vincent Ilardi, che insegna diplomazia all'Università di Amherst nel Massachusetts (Stati Uniti d'America), nel corso di un suo studio sul carteggio degli Sforza, Granduchi di Milano nel XV secolo, ha trovato, fra tante altre, delle lettere con cui il loro Cancelliere richiedeva al suo corrispondente di Firenze, delle dozzine di lenti per miopi, « Perché sonno molti che ne domandano delli occhiali che se fanno lì ad Fiorenza, attento che la fama è che se fanno in più perfectione che in verun altro loco de Italia, ...Datum Mediolani XXI October 1462 » [44].

Il Prof. Ilardi riporta altri quattro documenti originali, da cui risulta che le lenti negative fiorentine erano richieste anche da altre parti d'Italia.

Questi documenti sono molto interessanti, oltre che per la luce che portano sulla evoluzione delle lenti per occhiali alla fine del Medio Evo, anche per il fatto che tutta la sia pure modesta documentazione circa l'esistenza di lenti divergenti nel XV secolo dell'Era volgare è stata trovata in uno o in alcuni carteggi privati, ma non una sola parola è stata trovata in un libro di scienza; e questa è una conferma inconfutabile del più assoluto disinteresse dell'am-

[43] Daniele Barbaro è nato a Venezia nel 1513 ed è morto nella stessa città nel 1570.

[44] V. Ilardi, *Eyeglasses and Concave Lenses in Fifteenth-Century. Florence and Milan: New Documents*, in « Reinaissance Quarterly », vol. XXIX, n. 3, Autumn 1976. La lettera di cui è stato riportato un piccolo brano si trova a Parigi, Bibliothèque Nationale, Fonds Italien, Cod. 1595, fo. 291.

biente matematico, fisico e filosofico e anche medico per una scoperta così importante come quella della correzione della miopia per mezzo di lenti divergenti. Non è un fatto trascurabile che neppure una parola sia stata scritta a questo proposito in un libro scientifico. Si può dire che nessuna « congiura del silenzio » è stata mai altrettanto unanime e duratura.

A dire il vero anche per la correzione della presbiopia è stato scritto soltanto qualche cenno, ma il caso è meno grave di quello che riguarda la correzione della miopia. Considerando bene i due casi, le lenti convergenti rivalutavano la vista di persone anziane, che, anche se erano numerose (per quanto nei secoli passati la vita media dell'uomo era assai inferiore a quella odierna) erano prossime al termine della loro vita attiva, mentre quelle divergenti valorizzavano dei giovani, che senza di esse erano anche fortemente minorati nelle proprie attività.

Ebbene, tutto il mondo colto non si è accorto che l'aver trascurato una invenzione, che ha ridato la normalità della vita a milioni di persone, al punto che tutti i beneficati non sanno chi ringraziarne (anche se lo volessero) ha costituito una grave tara per il suo prestigio, anche perché ciò ha distratto ogni contributo al progresso dell'invenzione, che sarebbe stato certamente più rapido e più conclusivo, se vi avessero collaborato i sapienti più competenti e più produttivi.

D'altra parte una condotta del tipo di quella tenuta dall'ambiente scientifico, trova una giustificazione molto « umana » nel considerarla un riconoscimento tacito, ma sincero della propria ignoranza in materia: un uomo di scienza non può permettersi di scrivere un libro su un argomento, di cui è costretto a dichiarare che ignora del tutto « gli effetti e le ragioni » di ciò che si propone di presentare ai lettori. E queste parole fra virgolette si trovano proprio in un libro di Giovan Battista Della Porta [45] di cui ci dovremo occupare nel seguito; ma, intanto, dato che trova giusta posizione nel discorso attualmente tenuto, vale la pena di riportare un piccolo commento che l'autore pone a titolo di presentazione al Cap. X, del Libro XVII della sua *Magia Naturalis* del 1589. Il titolo del Capitolo è: *De crystallinae lentis effectibus* (Sugli effetti della lente di vetro). Dopo aver premesso che vi sono lenti convesse e lenti concave, prima di passare a descriverne gli « effetti », afferma che questi

[45] G. B. Della Porta nacque a Napoli nel 1535 e vi morì nel 1615.

effetti sono necessari per gli usi della vita umana, e che a proposito delle lenti, nessuno ha sviscerato ancora, « né questi effetti né le ragioni » (« idem sint et specillorum effectus, qui maxime ad humanae vitae usum sunt necessarii, quorum adhuc nemo neque effectus, neque rationes attulit »).

È appena il caso di rilevare che il Porta, solito darsi delle arie di scienziato di alta classe, per indicare le lenti, usa il termine prestigioso di « specillum ».

Ma per convincere ancor meglio che la causa del silenzio dell'ambiente scientifico a proposito delle lenti era un tacito riconoscimento della sua ignoranza in questa materia, potrà essere utile un passo di un libro, che ancora G. B. Della Porta scrisse quattro anni dopo quello citato sopra, cioè nel 1593, col titolo *De Refractione*. Avremo occasione fra breve di esaminare più a fondo il contenuto veramente prezioso di quest'opera, ma fin d'ora ne riportiamo un brano dove l'autore tenta di spiegare come mai le lenti convergenti correggono la presbiopia:

Duplice è la causa per cui i vecchi con le lenti convesse ci vedono più chiaro e più perfettamente. In primo luogo perché in vecchiaia la pupilla si rilassa, e non soltanto la pupilla, ma tutte le membra e i freni delle membra, cosicché meno tratteggono l'orina e le feci; dunque per il rilassamento della pupilla i raggi vagano più liberamente e portano al cristallino l'oggetto disfatto e meno definito; invece per mezzo delle lenti convergenti i raggi del simulacro si riuniscono e più strettamente si compone la piramide, come abbiamo visto in precedenza, cosicché le lenti convergenti costringendo i simulacri compensano il difetto. La seconda causa è che, poiché ai vecchi l'umor vitreo si rende più alterato e impuro, come abbiamo provato nella prima proposizione di questo libro, quando la luce entra dentro attraverso un cristallo viene resa più chiara e più fulgida e così viene compensato il secondo difetto della natura proveniente dal catarro [46].

[46] «Duplex est causa cur senes convexis specillis clarius et perfectius cernant. Primo quia in senectute relaxatur pupilla, nec solum pupilla, sed omnia membra, et membrarum retinacula, ut laxius lotium, et faeces retineant, ex laxitate igitur pupillae radii liberius vagantur, et rem laxam, et minus certam crystallino reddunt: at convexis specillis simulachri radii coeunt, et arcius pyramis colligitur, ut vidimus in praecedenti, unde naturae vitium rependunt congregando specilla convexa simulachra. Altera causa est, quod senibus vitreus humor faeculentior, et impurior redditur, ut in prima propositione huius libri probavimus, intro permeans lux per cystallum clarior, fulgidiorque redditur, et naturae defectus alter ex pituita resarcitur ». G. B. Della Porta, *De Refractione*, Cantini, Napoli 1593, Libro VIII, Proposizione XIV.

Se si osserva che questa « spiegazione » (duplice per giunta) era data ben quattro secoli dopo l'invenzione delle lenti da occhiali, ed era data da uno, come il Porta, che in fatto di rifrazione era addirittura all'avanguardia, e che aveva perfino tentato di scrivere un libro sulla teoria delle lenti si può esser sicurissimi che l'applicazione di esse alla correzione della presbiopia fu un frutto del puro caso.

Un altro argomento in favore di questa tesi è fornito dalla evoluzione degli studi di ottica, per così dire geometrica, in quel periodo dal 1200 alla fine del 1500. In questo frattempo continuarono gli studi sulla rifrazione attraverso una superficie piana, e negli ultimi tempi cominciarono anche quelli della rifrazione attraverso una superficie curva. Ma le cose, disgraziatamente, furono istradate per una via senza uscita. Nell'intento di studiare la rifrazione nel caso *più semplice* dopo quello della superficie piana, fu preso in considerazione quello della *sfera completa*, e poi quello della semisfera.

Ora, si sa bene, oggi, che il comportamento di una sfera completa è molto complicato, dal punto di vista ottico, per l'intervento delle cosiddette « aberrazioni »; ma non vi era nessun indirizzo che portasse a considerare una piccola calotta della sfera stessa. Quando questo passo fu fatto, e ne riparleremo fra breve, l'ottica compì un progresso enorme. Ma intanto da tutto questo decorso degli studi di ottica nell'ultimo Medio Evo, risulta evidentissimo che nel 1200 nessuno aveva alcuna idea circa il funzionamento ottico delle lenti.

Più importante e più profondo è il terzo argomento, da cui si desume la giustificazione del contegno del mondo scientifico medioevale di fronte alle lenti.

Da quel poco che è stato scritto a proposito delle lenti, quando se ne cominciò a scrivere, risulta evidente una nota: la diffidenza generale del mondo filosofico verso di esse. La parola « fallacia » ricorre continuamente. Il ragionamento classico si può riassumere così: compito dell'organo della vista è di conoscere la verità, cioè la vera struttura del mondo esterno, rappresentando alla nostra mente la forma, la posizione e i colori dei corpi che lo costituiscono. Ciò avviene o mediante i raggi visuali che, uscendo dagli occhi vanno a esplorare gli oggetti, o mediante le specie, che questi oggetti, quando sono illuminati, inviano negli occhi dell'osservatore. La maniera migliore di conoscere la verità è di non alterare per nulla la forma rettilinea dei raggi, o la corsa regolare delle specie.

L'introduzione di specchi, di prismi, di lenti sul loro cammino

porta ineluttabilmente a una alterazione della verità, e difatti questi ordigni fanno vedere delle figure dove non sono gli oggetti materiali, e spesso le fanno vedere ingrandite, impiccolite, capovolte, deformate, sdoppiate, iridate. È tutto un inganno e una « fallacia ». In conclusione, si debbono eliminare accuratamente i mezzi ottici, quando si vuol conoscere la verità.

Questo era il tono generale: nessuno considerava le lenti (e anche gli specchi, specialmente se curvi) degni di uno studio serio e coscienzioso. Questo ragionamento è la chiave che permette di comprendere l'atteggiamento dell'ambiente scientifico medioevale, nel campo dell'ottica; purtroppo oggi esso è del tutto dimenticato dagli studiosi della storia di quei tempi e molti fenomeni storici non trovano una spiegazione razionale.

Del resto la citata *Margarita Philosophica*, che pure è una enciclopedia, ed è di data posteriore di circa tre secoli all'invenzione delle lenti da occhiali, non ne fa il minimo cenno, per quanto esse, a quell'epoca, fossero diffuse in tutto il mondo e i dotti, per il fatto che dovevano leggere, ne facessero largo uso.

Ma gli eventi maturavano. Ci avviciniamo ora al secolo XVI che preparò in questo campo innovamenti radicali.

Intanto Leonardo da Vinci [47], sia pure in base a qualche indicazione e forse sulle orme di Alhazen e di Vitellione, costruisce la « camera oscura » e, ciò che interessa di più, mette in evidenza la sua analogia con l'occhio:

> La sperienza, che mostra come li obbietti mandino le loro spezie over similitudini intersegate all'occhio nell'umore albugino, si dimostra quando per alcuno piccolo spiraculo rotondo penetreranno le spezie delli obbietti illuminati in abitazione forte oscura. Allora tu riceverai tali spezie in una carta bianca, posta dentro a tale abitazione alquanto vicina a esso spiraculo, e vedrai tutti li predetti obbietti in essa carta colle loro propie figure e colori, ma saran minori e siano sottosopra... E così fa dentro la pupilla [48].

Con questa osservazione di Leonardo si chiude il periodo medioevale dell'ottica. In tutto questo millennio teorie nuove sulla

[47] Leonardo nacque a Vinci (presso Firenze) nel 1452 e morì nel castello di Cloux (presso Amboise) nel 1519.

[48] Manoscritto D dell'Istituto di Francia.

luce non ne sono sorte, e veramente bisogna riconoscere che dopo lo sfruttamento del campo da parte degli antichi filosofi non vi era molto da fare. Ma nell'ambito delle teorie sopravvissute si sono avuti dei chiarimenti d'importanza fondamentale.

Come abbiamo notato, l'ottica antica aveva generato l'*ottica geometrica*, imperniata sul postulato della propagazione rettilinea della luce, sulla legge della riflessione e su qualche esperienza di rifrazione. Nel Medio Evo questa ottica continuò nel suo svolgimento, purificando sempre più la natura dei suoi raggi da ogni sovrastruttura fisica ed accentuandone il carattere ipotetico e geometrico. Particolarmente notevole è stato il lavorio sul comportamento delle superficie curve, come superficie riflettenti e come superficie rifrangenti.

Fondamentale è stato l'apporto degli studi nel campo fisiologico, sia per la più accurata conoscenza anatomica dell'occhio, sia, nel nostro argomento, per la demolizione definitiva dei raggi emessi dall'occhio verso l'esterno. Ormai soltanto i matematici cultori della prospettiva geometrica e qualche nostalgico ammiratore dell'antichità osava ricordare che si era parlato anche di tali raggi.

L'esistenza di un *lumen* fisico, esterno all'occhio, era ormai ritenuta indiscutibile; e si trattava di un quid emesso dal sole o dalle fiamme, capace di illuminare i corpi, facendone emettere le specie, capace di impressionare gli occhi umani fino a fargli sentire dolore e a lasciarvi un'impressione assai duratura; capace di riflettersi negli specchi concavi, fino ad accendere il fuoco.

Nonostante la intensa discussione svoltasi specialmente nel XIII secolo, meno definite erano le idee circa la natura della *lux*, della luce che si vede: natura che mentre inizialmente aveva raggiunto un livello sublime e quasi divino, poi era andata sempre più perdendo quota, e insieme anche interesse; il suo carattere prettamente psichico si era andato via via attenuando, fino quasi ad essere oggettivato in una qualità superficiale dei corpi luminosi o illuminati.

Il meccanismo della visione non era ancora pervenuto ad una maturità tale da potersi dire risolto; ma negli studi dell'Alhazen vi era in embrione il concetto che presto diverrà quello definitivo, e che ancora era rimasto come sepolto sotto le scorze, le specie e i simulacri, da cui i filosofi occidentali, troppo formati alla scuola greco-romana, non avevano saputo liberarsi; essi avevano tentato di conciliarli con le idee rivoluzionarie dell'arabo, traendone una costruzione grottesca e come tale destinata a trasformarsi a breve

scadenza. I confronti tra la camera oscura e l'occhio sono già cominciati e porteranno ben presto alla soluzione desiderata.

E infine sono entrate decisamente nell'uso le lenti da occhiali, quelle ricolme per la correzione della presbiopia e quelle cave per la correzione della miopia. Questi piccoli dischetti lucidi di vetro, apprestati, confezionati e diffusi da modesti artigiani, del tutto ignari delle difficili elucubrazioni scientifiche e filosofiche, si moltiplicavano a migliaia sotto gli occhi diffidenti dei matematici silenziosi e scettici, preparando quella rivoluzione che doveva cambiare radicalmente la mentalità dei filosofi nei riguardi dell'ottica.

Perché in tutto questo studio, in cui il carattere fisiologico è prevalente ed evidente, accanto a tante osservazioni che ormai davano all'*ottica fisiologica* una mole e una autonomia degne di una scienza a sé stante, molta, forse troppa attenzione era stata dedicata alle « illusioni ottiche », alle « deceptiones visus ». Il trovare che un ordigno, di cui non si riesce a ricostruire il meccanismo, assai spesso dà indicazioni erronee o alterate, porta necessariamente alla sfiducia e alla diffidenza. E ciò sia per l'occhio nudo, sia, a maggior ragione, per l'occhio munito di mezzi ottici.

È interessante a questo proposito un brano del *Trattato della Pittura* di Leonardo da Vinci. La testimonianza di Leonardo ha un valore particolare, perché egli non faceva parte dell'ambiente accademico e dell'alta cultura, ma era un artigiano autodidatta, sia pure di ingegno stupefacente. La sua voce dunque è un po' quella dell'uomo della strada. Egli scrive, con frasi incisive: « I maestri non si fidano nel giudizio dell'occhio, perché sempre inganna, come prova chi vuol dividere una linea in due parti uguali, a giudizio d'occhio, che spesso la sperienza lo inganna. Onde per tale sospetto i buoni giudici sempre temono, il che non fanno gli ignoranti ».

Questo scetticismo, questa diffidenza era la grande tara dell'ottica medioevale.

Capitolo terzo

LA CATASTROFE DELL'OTTICA ANTICA

Il brano del *De Refractione* di G. B. Della Porta è stato riportato nelle ultime pagine del Capitolo precedente per dare al lettore ancora un'idea di quanto fossero primordiali le idee dominanti circa questioni fondamentali dell'ottica, nonostante che già da oltre tre secoli fossero state applicate le lenti convergenti alla correzione della presbiopia e quelle divergenti alla correzione della miopia; confermando così, ad esuberanza, la diagnosi della situazione, più volte messa in evidenza: l'ambiente dell'alta cultura, sentendosi teoricamente del tutto disarmato circa il funzionamento delle lenti, e avendone costatato il comportamento illusorio in una quantità enorme di casi, aveva adottato all'unanimità la risoluzione di condannarle come ordigni fallaci e considerarle indegne di essere oggetto di ricerca scientifica.

E anche quando degli artigiani intelligenti e intraprendenti ne trovarono praticamente conveniente l'impiego come « lenti ustorie » per accendere il fuoco mediante la concentrazione della radiazione solare, gli uomini di scienza furono costretti nel loro interno a riconoscere che non sapevano trovarne una ragione, la quale li mettesse in condizione di dimostrare agli allievi e al pubblico che essi erano padroni della materia e conclusero ancora che era preferibile continuare ad applicare l'ostracismo, già decretato dai predecessori. Tanto più che un indirizzo conservatore a quei tempi era quasi d'obbligo.

Non è fuor di luogo ricordare a questo proposito che Euclide nella sua *Catottrica* non disdegna di dimostrare che uno specchio concavo poteva anche funzionare come « specchio ustorio », per-

ché ne sapeva dare una dimostrazione teorica, oltre che pratica; ma al tempo stesso non fa alcuna allusione alle lenti ustorie che già da tempo erano in uso per accendere il fuoco; circa le quali egli sapeva che non poteva presentare alcuna giustificazione.

Dunque le lenti convergenti erano ancora per gli uomini di scienza ordigni « fallaci » e « ingannatori » in mille occasioni; anche se in una particolare condizione erano utili ad accendere il fuoco mediante il concentramento della radiazione solare.

Il silenzio con cui tutti gli uomini di scienza hanno accolto la notizia che ancora degli artigiani, ponendo delle *particolari* lenti convergenti vicine (*in una posizione particolare*) agli occhi di una persona anziana, ridavano ai suoi occhi la capacità di vedere nitidi gli oggetti vicini, come in gioventù, (ma anche questa era una prestazione possibile in pochi casi, assai rari), dimostra che non era demolita la vecchia dimostrazione che « in mille occasioni erano ancora ordigni fallaci e ingannatori ». Quindi bisognava diffidarne; tanto più che non si sapeva nulla circa il loro funzionamento. Quindi, la direttiva che meritava di esser confermata era ancora quella dominante da millenni.

Sempre gli artigiani intelligenti e intraprendenti trovano che dei « vetri cavi », fratelli delle lenti convergenti, se vengono messi (*in una posizione particolare*, anche questi) davanti e vicini agli occhi di tutti coloro, giovani e anziani, che hanno la « vista debole » possono permetter loro di vedere il mondo, proprio come una persona che abbia gli occhi normali. È un duro colpo per gli scettici circa le applicazioni delle lenti fallaci e ingannatrici; ma prima di prender per buona anche questa nuova virtù, conviene attendere e intanto non parlarne affatto, continuando a seguire la direttiva che i saggi avevano applicato per millenni. E così si giunge al secolo XVI dell'Era volgare.

Continuerà ancora a dominare la direttiva dominante da millenni? Lo si può escludere sicuramente. Il fatto che oggi un discorso come quello fatto qui sopra si considera talmente assurdo che i più non credono neppure che sia mai stato fatto, dimostra che è avvenuto un cambiamento profondo nel modo comune di pensare circa l'ottica. Proprio la storia di questo cambiamento costituisce uno dei capitoli più interessanti e più importanti della storia del pensiero scientifico, e forse anche del pensiero umano.

Oggi può essere ricostruito traendo le notizie da una quantità notevole di documentazione; ma non si può considerare completa

ed esaurita, perché si può dire che la quasi totalità di quella utilizzata in passato proveniva da fonti non disinteressate. È naturale che la storia di come si sono evolute le idee sia stata ricostruita compulsando testi scientifici, giustamente considerati come i più ricchi di notizie circa le idee dei grandi matematici, dei grandi filosofi, e di tutti i grandi uomini di scienza in generale. Sul contenuto delle loro opere sono stati compiuti studii molto profondi da parte di competenti di valore indiscutibile.

Da vari casi recenti, almeno nel nostro campo, è risultato che notizie derivanti da documenti del tutto estranei al campo scientifico hanno fornito notizie importantissime, e soprattutto capaci di modificare profondamente la storia che era stata ricostruita esclusivamente su documentazione di tipo scientifico.

Basti citare un esempio: fino a pochi decenni addietro era convinzione generale che alla fine del XIII secolo dell'Era volgare fossero stati inventati, non si sa da chi, lenti e occhiali. Lo scetticismo dell'ambiente scientifico contro le lenti era stato accuratamente minimizzato, dimenticato e nessuno ne faceva cenno. Eppure esisteva in proposito una documentazione più che sufficiente a dimostrarne la durezza e le conseguenze, non sempre gradevoli. Ci voleva la riesumazione di una notissima commedia di Aristofane a richiamare l'attenzione sulle « lenti ustorie » in vendita nei negozi di Atene nel V secolo a. C.; e ci voleva il carteggio dei Principi di Milano per dare notizie decisive circa la produzione delle prime lenti negative applicate alla correzione della miopia. E le commedie di Aristofane non sono documenti scientifici, come non lo sono le lettere degli Sforza.

Abbiamo richiamato l'attenzione dei lettori sul problema della documentazione, perché proprio questo problema può riserbare delle sorprese relativamente al cambiamento profondo che si produsse nei secoli XVI e XVII e che fu il risultato degli studi di alcuni scienziati di primissimo piano. Però la documentazione presenta qualche anomalia, per eliminare la quale sono ancora in corso delle ricerche bibliografiche. Una parte di queste ricerche ha già dato in questi ultimi anni risultati di valore indiscutibile, e ne sarà data notizia nelle pagine seguenti; ma sarebbe gradita, anche se non proprio necessaria, qualche altra prova documentaria.

Se il risultato non fosse già scontato, non ne avremmo ancora parlato in questa sede; ma è opportuno impostare il problema in termini reali, in modo che le ulteriori conferme di cui si farà cenno e che potrebbero essere anche imminenti, non possano modificare sostanzialmente la ricostruzione più recente a cui siamo pervenuti.

L'ottica antica e quella medioevale, molto simile alla prima, affermatasi anche per il prestigio di cui godevano, almeno fino al secolo XVI, i grandi saggi del periodo greco-romano e arabo, era in pieno vigore anche per l'indirizzo conservatore dominante in tutto il mondo civile nei primi secoli dell'Era volgare. Era insegnata in tutte le scuole, e specialmente in quelle più elevate, e il commento di Leonardo da Vinci, riportato alla fine del Capitolo precedente, ci fa sapere che « I maestri [cioè *tutti* i maestri] non si fidano nel giudizio dell'occhio perché sempre inganna ». Non solo, ma il concetto è ribadito nella frase finale: « Onde, per tale sospetto i buoni giudici sempre temono, il che non fanno gli ignoranti ». E questo Leonardo lo scriveva nel segreto dei suoi appunti, che soltanto il suo esecutore testamentario, il Melzi, ha rivelato, introducendo questo breve brano, pericolosissimo, nel *Trattato della Pittura*, quando Leonardo era già defunto.

Il brano era « pericolosissimo », perché ci dice che chi dimostrava la sua « fede » nel *giudizio dell'occhio*, dai buoni giudici era svalutato come un « ignorante ». In un clima scientifico di questo tenore chiunque si fosse indirizzato per la carriera culturale, si sarebbe guardato bene dal correre un tale pericolo, che avrebbe comportato il sicuro fallimento della sua carriera. Senza contare che la maggior parte dei « maestri » e di quelli considerati « buoni giudici » erano dei potenti prelati.

Così passavano i secoli e l'ottica continuava ad essere considerata una scienza perfetta ed esente da ogni possibilità di cambiamenti profondi.

Queste considerazioni ci renderanno conto del come difficile fu il compito di chi capì che la situazione di fatto della scienza ottica era ben diversa, e che si doveva trovare la via di un rinnovamento, possibilmente senza troppo sacrificio dei propri interessi sociali.

Leonardo da Vinci, col brano riportato sopra, ci dà lo spunto: le critiche, se qualcuno arrivava a concepirle, potevano anche esser formulate, ma dovevano restare clandestine, perché soltanto così

non avrebbero avuto ripercussioni sgradevoli. Anche se poi i posteri, impegnati nella ricerca dei documenti storici delle innovazioni, non li avrebbero trovati. Peggio per loro.

Un caso storico, (non molto noto, ma molto probativo), è quello di Copernico. Nella maggior parte della letteratura scientifica egli viene presentato come il grande astronomo, a cui si deve l'affermazione del sistema solare eliocentrico. Ma le vicende della sua vita sono state ben diverse da quelle di un astronomo. Come nipote del vescovo titolare della Curia di Fromborg, in Polonia, egli abbraccia la carriera ecclesiastica e viene in Italia a studiare diritto canonico, teologia e medicina, presso le famose Università di Bologna, di Ferrara e di Padova. Tornato in patria si dedica a fondo all'attività ecclesiastica (ricevendo anche i Sacri Ordini Superiori) come segretario della Curia diretta dallo zio. Viene anche nominato medico capitolare ed esercita in pieno tale professione.

E fa anche l'astronomo: perché in quel tempo la medicina era strettamente legata all'astronomia, attraverso l'astrologia: i medici stilavano le ricette osservando la struttura del cielo nei riguardi dei pazienti. Fu nel corso di queste osservazioni che Copernico incontrò difficoltà nel suo lavoro sanitario, per le differenze che trovava fra i risultati delle osservazioni stesse e le effemeridi calcolate in base alla struttura dell'universo geocentrico; differenze che la precisione delle misure astronomiche raggiunta a quel tempo rendeva intollerabili.

Ma egli in Italia, e specialmente a Bologna, aveva appreso che già diciotto secoli prima, alcuni filosofi greci, e soprattutto Aristarco di Samo, avevano già pensato che il Sole doveva essere al centro delle orbite dei pianeti: allora egli riprende questa idea, la confronta con le novità astronomiche affermate da Aristarco in poi, e giunge alla conclusione che le cose celesti concordano con maggior precisione con le osservazioni del suo tempo, calcolandole col modello eliocentrico, che non con quello geocentrico.

Nel 1503, egli aveva 30 anni quando cominciò a scrivere il suo unico libro astronomico, il famoso *De revolutionibus orbium coelestium*. Vi lavora per 27 anni (senza trascurare il suo dovere curiale e specialmente quello di medico); ma a lavoro finito, per quanto, avendo messi al corrente delle sue conclusioni, *a voce*, varii amici, ne ricevesse numerosi inviti, anche molto autorevoli, non vuole pubblicarlo. Dieci anni più tardi, un giovane astronomo (non ecclesiastico) dopo un colloquio col Copernico stesso, si prese

l'iniziativa di pubblicarne un riassunto a Danzica. Copernico si rese conto che ormai la sua riservatezza era stata tradita e poco dopo inviò il manoscritto del *De revolutionibus* a Norimberga per la stampa. Il giorno stesso dell'invio una gravissima emorragia cerebrale ne paralizzò la metà del corpo.

Nel 1543 gli viene presentato il primo esemplare stampato del suo capolavoro; ne risente uno shock tale, che il giorno stesso egli passa a miglior vita.

Molto meno drammatica di quella ora riassunta è la storia di un altro prelato, di cui ci dobbiamo occupare ora perché proprio a lui si deve l'inizio della rivoluzione che portò alla catastrofe dell'ottica antica: l'abate Francesco Maurolico da Messina. A suo tempo fu una delle personalità più conosciute e più ammirate per i suoi meriti personali e soprattutto per la sua enorme e svariata produzione scientifica.

Sul suo valore come ricercatore e come personaggio di spicco nell'ambiente scientifico italiano, ritorneremo dopo avere analizzato il nuovo indirizzo che l'ottica ha iniziato per il suo intervento nel corso del XVI secolo. Egli era nato a Messina nel 1494 (cioè era di 21 anni più giovane di Copernico), da una famiglia nobile che era giunta in Sicilia fuggendo da Costantinopoli quando questa era stata occupata dai turchi. Alle sue origini orientali certamente si deve il nome siciliano della sua famiglia. Ma conviene analizzare un po' nei particolari ciò che ha lasciato scritto in fatto di ottica.

Si tratta di un'operetta composta di due parti, la prima delle quali porta il titolo: *Photismi de lumine et umbra ad perspectivam, et radiorum incidentiam facientes*; e la seconda ha il titolo: *Diaphaneon, seu transparentium*, ed è divisa in tre Libri, o Capitoli. Come vedremo, presenta un interesse che non è esagerato valutare enorme.

La sua struttura è la seguente: dopo alcune definizioni e ipotesi, su cui torneremo fra breve, si parla della illuminazione maggiore o minore che si ottiene con raggi diversamente inclinati rispetto alla superficie che li riceve; si studiano le ombre portate e il passaggio dei raggi attraverso un foro, fino a spiegare le macchie rotonde di Sole sotto le foglie degli alberi; si studia la riflessione sugli specchi piani e su quelli sferici, concavi e convessi e infine si fa un cenno degli specchi cilindrici e piramidali.

Nei tre Libri dei *Diaphaneon* si tratta della rifrazione attraverso

una superficie, attraverso una lamina piana e attraverso un prisma; si studia la « sphera crystallina » e l'arcobaleno; si riporta l'anatomia dell'occhio, si espone il meccanismo della visione e infine si spiega il funzionamento delle lenti per occhiali. Nell'ultima parte sono proposti ventiquattro quesiti relativi all'ottica e all'arcobaleno (« Problemata ad perspectivam et iridem spectantia »).

Entrando un po' più addentro nei particolari, nel gruppo delle ipotesi (« Supposita ») si trova:
« 1° Ogni punto di un corpo luminoso irradia in linea retta. »
« 2° I raggi più densi illuminano più intensamente; quelli ugualmente densi, ugualmente. » [1]

A queste ipotesi segue subito il 1° Teorema, che dice: « Ogni punto di un corpo luminoso irradia in ogni punto di un oggetto illuminato » [2].

Il Teorema XXII suona così: « Le figure di oggetti luminosi attraverso un foro si riportano capovolte sopra un piano » [3].

È la camera oscura, evidentemente; ma è notevole che l'autore applichi questo ragionamento alla spiegazione delle macchie rotonde di Sole sotto le foglie degli alberi, problema insoluto fin dal tempo di Aristotele.

E così il Teorema XXIII afferma che una superficie illuminata da una luce pura emette una luce secondaria, di colore simile a quello della luce illuminante [4].

A proposito poi degli specchi concavi, il Maurolico considera la riflessione di raggi partenti da un punto situato sia sull'asse, sia fuori dell'asse. Gli studi geometrici di questo caso, precedenti, concordavano in una conclusione generale ed incontrovertibile: che i raggi riflessi da punti dello specchio situati a distanze diverse dal suo vertice tagliavano l'asse in punti diversi, cosicché non for-

[1] « 1. Omne lucidi punctum per rectam radiare lineam. 2. Densiores radios intensius: aeque vero densos aequaliter illuminare ». Francesco Maurolico da Messina, *Photismi de lumine et umbra ad perspectivam, et radiorum incidentiam facientes*, p. 2.

[2] « Theorema I: Unumquodque lucidi punctum in quidlibet illuminatae rei signum radiat », ivi, p. 2.

[3] « Theorema XXII: Lucidorum per foramen in planum, quodpiam radiantur formae conversae porriguntur », ivi, p. 16.

[4] « Theorema XXIII: Omnis a pura luce illuminata superficies, secundariam lucem colori suo similem emittit », ivi, p. 19.

mavano mai un cono (quel cono, il cui vertice oggi si chiama *punto immagine*), ma inviluppavano una superficie oggi detta *caustica.* Le immagini formate dagli specchi concavi erano spiegate, dall'ottica antica, immaginando che le specie dell'oggetto, riflesse dallo specchio, seguissero il percorso di uno dei raggi riflessi (di quale fra tutti non lo diceva nessuno) come una guida.

Nel testo del Maurolico, le specie non vengono nominate; l'oggetto è considerato puntiforme, diversi raggi che partono da tale punto incidono sullo specchio ed è notato che tutti quelli che si riflettono su una circonferenza col centro sull'asse (quella che oggi si chiama una *zona* dello specchio) costituiscono proprio un cono col vertice sull'asse (figg. 1, 2 e 3).

L'ultimo Teorema dei *Photismi*, il XXXV, il cui enunciato è: « Dal concentramento dei raggi è possibile generare il fuoco », fra l'altro contiene questo concetto: « Nello specchio cavo AB (fig. 3) dal punto C del corpo solare incidono i raggi CD, CE, CF che concorrono quasi in un unico punto G. Infatti sebbene, come è risultato da ciò che si è detto sopra, i raggi giunti allo specchio da uno stesso punto non concorrono, dopo riflessi, in uno stesso punto, tuttavia manca poco a che i raggi riflessi da una piccola porzione dello specchio concavo si riuniscano in uno stesso pun-

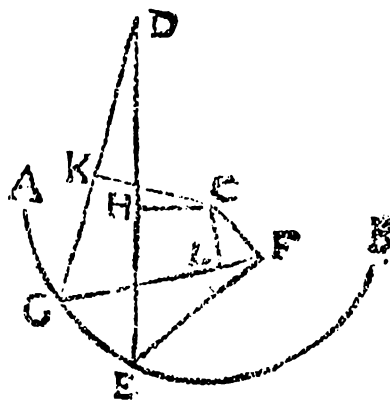



Fig. 1 La riflessione in uno specchio sferico, come è considerata da P. Maurolico nei *Photismi*.

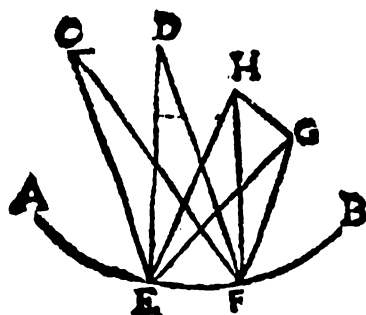



Fig. 2 Altro schema con sorgente doppia, della riflessione su uno specchio sferico, come è considerata da P. Maurolico nei *Photismi*.

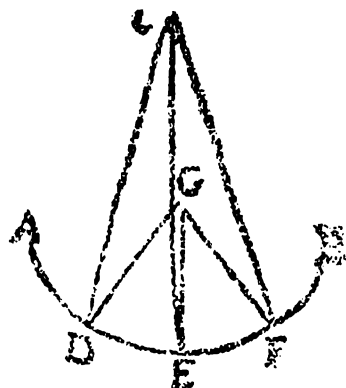



Fig. 3 Dimostrazione della confluenza in un punto, dei raggi riflessi da uno specchio sferico concavo, come si trova nei *Photismi*.

to;... » [5]. Alla fine del Teorema è riportata una frase con l'indicazione del luogo e della data in cui il lavoro è stato concluso: « Finito in Messina l'anno del Signore 1521, il 19 del mese di ottobre » [6].

[5] « In cavum speculum AB, a signo solaris corporis C, radii cadant CD, CE, CF, qui ad unum fere punctum concurrant G. Quamvis enim sicut in ante praemissis patuit, radii ab eodem signo in speculum tendentes ad idem reflexi punctum non concurrant parvum tamen, quin a parva cavi speculi portione punctum radii conveniant;... », ivi, p. 29.

[6] « Completum Messanae Anno Domini 1521. Mensis Octobris die 19 », ivi, p. 29.

Il giovane Francesco Maurolico, quando ha terminato questo capolavoro, aveva compiuto da appena un mese il suo venticinquesimo anno di età. In quello stesso anno, per dedicarsi con più disponibilità di tempo ai suoi studi preferiti, egli ricevette gli ordini sacri dall'arcivescovo di Messina e al tempo stesso, avendo perduto il padre, e non desiderando impiegare del tempo nella cura del patrimonio familiare, lo affidò completamente al fratello minore, Jacopo.

Al tempo stesso, pur avendo avuto cura di registrare la data e il luogo in cui aveva terminato quel suo studio di ottica, pensò bene di non darlo alle stampe. Le ragioni, probabilmente, sono state quelle che sono state premesse all'inizio di questo Capitolo.

L'aver chiuso questo Capitolo delle sue ricerche non ha voluto dire abbandonare il campo dell'ottica. È il caso di continuare a seguirne lo sviluppo come lo espose nel *Diaphaneon, seu transparentium*. Ma prima conviene non trascurare un particolare che riguarda ancora i *Photismi*: alla fine, dopo il Teorema XXXV, sopra citato, si trova aggiunta una pagina dedicata ai difetti degli specchi (« De erroribus speculorum »). L'argomento non riguarda il nostro studio, ma è interessante rilevare che in fondo a quella paginetta è scritta un'altra data, posteriore di ben 34 anni a quella sopra ricordata: « 13 Giugno 1555. Festa dell'Eucarestia ». Non è privo di significato che il giorno della Festa dell'Eucarestia un abate pensi ai difetti degli specchi, fino al punto di dedicar loro un piccolo componimento, e non abbia ritegno a corredarlo della data e dell'oggetto della festività. Se si può arguirne qualche commento, si può pensare che egli in quel giorno abbia avuto un'idea circa gli errori degli specchi, che lo ha affascinato, al punto che l'ha considerata un dono del Cielo, degno di essere registrato in maniera solenne. Ma è anche un segno che egli non aveva dimenticato il manoscritto di 34 anni prima. E veniamo ai *Diaphaneon Libri Tres*.

Fra le ipotesi premesse, meritano speciale segnalazione la 3ª e la 4ª:

« 3ª Moltiplicando l'angolo di inclinazione, anche l'angolo di rifrazione viene moltiplicato egualmente. »

« 4ª L'oggetto appare nel punto di incrocio del prolungamento del raggio visuale con quello perpendicolare al piano trasparente condotto dall'oggetto. » [7]

[7] « 3. Multiplicato angulo inclinationis angulum quoque fractionis aequaliter multiplicari.

La prima ipotesi è la stessa che anche oggi si usa nell'ottica geometrica elementare. Per la 4ª ipotesi, si può dire che il Maurolico lo considera un risultato dell'osservazione sperimentale, e lo esprime molto correttamente.

Procedendo poi nei teoremi del I Libro *Diaphaneon* si trova studiata la rifrazione attraverso una lamina a facce piane e parallele, e anche attraverso un prisma, e anche attraverso un biprisma.

Dice infatti il Teorema IV: « Avviene che a causa della rifrazione dei raggi di un oggetto se ne vedano di più » [8]. E l'Autore dimostra il fatto con una figura contenente un biprisma. Il Teorema VI: « Se i piani del corpo trasparente non saranno paralleli, l'oggetto non si vedrà mai in linea retta, ma per raggi fratti da entrambe le parti ad angoli *retti* » [9]. La figura annessa e il testo sostituiscono quel *retti* con *uguali* (« aequos »).

È questa la prima volta che un prisma viene considerato in un libro di ottica.

Si passa quindi allo studio della « sphaera diaphana ». Il tono della trattazione è lo stesso come per gli specchi concavi, e alla fine il Teorema XXIV, che chiude il I Libro, e che tratta della produzione del fuoco per concentramento di raggi [10] ripete la nota che i raggi rifratti da una sfera trasparente vengono concentrati quasi in uno stesso punto (fig. 4).

Segue il secondo Libro, dedicato all'arcobaleno. Non entriamo a fondo nell'argomento, perché ci allontana assai dal nostro; ma dobbiamo notare che alla fine del II Libro è ancora posta una data: « Sera della domenica nell'ultima vigilia, 12 Febbraio 1553 » [11]. A quell'epoca nessuno aveva ancora detto quello che in questo Libro dice P. Maurolico a proposito dell'arcobaleno. Ed egli questo lo rileva in un avviso « ad Lectorem » che chiude il Libro stesso, e aggiunge che all'ultimo momento è stato informato che il cano-

4. Rem apparere in loco concursus radii visualis recti cum ea, quae ab re ipsa in planum diaphani, perpendicularis progreditur », ivi, p. 31.

[8] « Theorema IV. Contingint propter radiorum fractionem unum plura videri », ivi, p. 32.

[9] « Theorema VI. Si diaphani plana parallela non erunt, nunquam res per lineam spectabitur directam, sed per radium utrimque ad rectos fractum angulus », ivi, p. 33.

[10] « Theorema XXIV. Contingit ex radiorum congressu ignem generari ». ivi, p. 48.

[11] « Hora vespertina diei Dominici in Carnisprivio postremi. 12 Febr. II Indit 1553 ». Ivi, p. 68.

nico viennese Andrea Stiboni aveva fatto qualche cosa di simile; lascia pertanto al lettore il compito di confrontare i due testi, per stabilire la priorità.

Il seguente Libro III è dedicato alla visione. Viene riportata l'anatomia dell'occhio, presa dal Vesalio, famoso anatomico belga; e quindi viene esposto il meccanismo della visione. Premesso che qui « pupilla » vuol dire cristallino, si nota subito un linguaggio che si distacca assai da quello generalmente usato in quell'epoca.

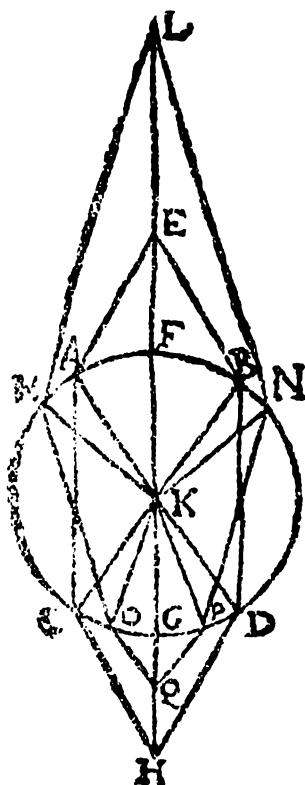



Fig. 4 - Dimostrazione della confluenza in un punto dei raggi rifratti da una sfera trasparente, come si trova nei *Diaphaneon*.

P. Maurolico considera ancora il cristallino come sede della « virtù visiva »[12]; ma aggiunge subito una cosa nuova, e poco conciliabile con la precedente: « dalla sua forma dipende la qualità della vista, o breve o lunga »[13]. Aggiunge anche che il cristallino ha la funzione di ricevere le specie, e di trasmetterle al nervo ottico, attraverso all'umore albugineo (o vitreo).

All'anatomia dell'occhio segue un paragrafo « Sulle lenti. Come i raggi visuali trasmessi per un corpo trasparente convesso da entrambe le parti, vanno prima a concentrarsi: così passando attraverso ad uno concavo da entrambe le parti più si allargano »[14]. La figura annessa (fig. 5) spiega subito il modo di considerare le cose.

Nelle otto pagine di questo paragrafo sono contenute delle cose di grande importanza.

È detto che maggiore è la curvatura delle facce, più rapida è la concentrazione o la dilatazione dei raggi.

Viene poi studiato il cristallino, come lente, e pur considerandolo come ricettacolo delle specie, viene considerato anche come il trasmettitore di esse alla retina. Per questo scopo è notato che giustamente non ha la forma sferica, ma ha una forma lenticolare, perché così non capovolge le specie e le fa arrivare concentrate, ma diritte sulla retina. La superficie anteriore è destinata a ricevere le specie, quella posteriore a trasmetterle[15].

Nello studiare questo processo, considera il corpo punto per punto e i raggi emessi da ciascun punto, riprendendo l'idea di Alhazen, che il raggio perpendicolare fosse quello predominante sugli altri circostanti: però viene notato che ci sono anche questi e che penetrano nella pupilla. In questo modo viene a concludere che prima di convergere, e quindi di produrre un'inversione, questi raggi portano, « attraverso la cornea, l'umore acqueo, il cristal-

[12] « Inter ea, quae, ad visum spectant, dignitatis arcem obtinet glacialis sive chrystallinus humor, quem et pupillam appellare meo judicio possumus: in qua visiva virtus, tamquam in sede consistit », ivi, p. 69.

[13] « Ab huius forma dependet qualitas visus, sive brevis, sive longi... ivi, p. 70.

[14] « De Conspiciliis. Sicut radii visuales per convexum utrinque diaphanum transmissi citius in angustum coeunt: ita per concavum utrinque traiecti magis dilatantur », ivi, p. 73.

[15] « Fuit quoque ut dictum est, pupilla duabus faciebus convexis unita, ut anteriori reciperet visibilium species, et posteriori transmitteret in communem sensum », ivi, p. 74.

lino e il vitreo » una figura simile all'oggetto e trasportata accuratamente [16].

P. Maurolico critica i predecessori che avendo fatto giungere le specie al cristallino, non si sono preoccupati del come ne dovevano uscire dalla faccia posteriore, per raggiungere la retina.

Trova quindi naturale che dalla forma del cristallino dipendano i vari tipi di vista. Cristallino troppo curvo vuol dire vista breve (miopia); cristallino più piatto significa vista lunga.

Alla forma del cristallino e alla sua variazione riporta anche la differenza di capacità visiva fra i giovani e i vecchi, ossia la presbiopia. E di tutto ciò oltre che una spiegazione a base di maggior o minor convergenza di raggi, dà una prova sperimentale a base di lenti. Ecco perché le lenti cave correggono la vista breve, e quelle convergenti quella lunga: perché correggono la conver-

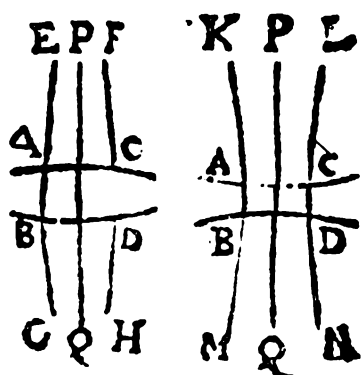



Fig. 5 Rappresentazione dell'effetto convergente o divergente delle lenti, nei *Diaphaneon* di P. Maurolico.

genza dei raggi. Per questo occorrono lenti di grado diverso a seconda dell'entità del difetto. Ed anche si possono usare lenti di grado diverso per leggere a diverse distanze.

Collega anche l'età dell'osservatore con la diversa curvatura delle lenti che gli occorrono per vedere da vicino.

[16] « ... quae priusquam in verticem coeat, per corneam, aqueum, glacialem, vitreumque humores ipsius basis speciem ad visorium nervum in quam simillimam figuram servatam, officiosissimeque transvectam baiulatur », ivi, p. 76.

Passa quindi a studiare le lenti come concentratrici di raggi ed estende esplicitamente ad esse le conclusioni trovate in precedenza per gli specchi concavi e per le sfere trasparenti. Attraverso una lente convessa i raggi, per quanto non vadano a concentrarsi in un punto, vi vanno molto vicino. E ciò si può vedere benissimo interponendo una lente sopra un fascio di raggi solari che penetrano in una stanza oscura attraverso un'apertura assai stretta: il concentramento si osserva dalla luce diffusa dalla polvere illuminata.

E come negli specchi concavi sostituendo la forma sferica con quella parabolica si può ottenere un concentramento perfetto dei raggi riflessi in un punto, forse è possibile costruire delle lenti di tale figura che concentrino esattamente in un punto i raggi trasmessi, ottenendo così un effetto calorifico maggiore [17].

La data è posta anche al termine di questo Capitolo: « Nella fortezza di Catania, l'8 Maggio 1554 » [18].

Chi legge i *Photismi* e il *Diaphaneon* ha certamente la sensazione di un linguaggio che non si discosta molto da quello dei testi di ottica elementare dei giorni nostri; ma la sensazione di quanto sia profonda la diversità dal modo di esprimersi (e quindi anche delle idee di fondo) dei cultori dell'ottica antica sarà addirittura stridente, quando si proceda a un confronto (che si potrebbe dire meglio un contrasto) con un testo scritto nel linguaggio tipico dell'ottica antica.

Proprio questo confronto lo offriamo ora ai lettori, perché lo svolgimento naturale della nostra storia ci porta a esaminare volumi molto interessanti e pieni di notizie atte a informarci a fondo sulla scienza ottica di almeno due millenni precedenti. Si tratta della *Magia Naturalis* e del *De Refractione*, entrambi di un autore notissimo ancor oggi e di cui è stato prezioso l'intervento, anche se non proprio dal punto di vista scientifico. Del resto il brano che abbiamo riportato nelle ultime pagine del Cap. II, avrà già dato un'idea dei discorsi di cui sono pieni quei due volumi. Eppure, nonostante la modestia del loro livello scientifico, sono

[17] « ... ita fortasse liceret fabricare ex vitro, chrystallo, aliove perspicuo lapide convexum talis figurae diaphanum, per quod fracti radii in unum punctum congressi, efficacissimi essent ad ignis generationem », ivi, p. 80.

[18] « In arce Catanensi, die 8 Maii 29. II Indictionis 1554 », ivi, p. 80.

pieni di notizie e di idee di notevole importanza per comprendere per quali vie è passato il progresso della scienza ottica.

Cominciamo dalla *Magia Naturalis*. Dobbiamo subito mettere in evidenza una circostanza, di cui avremo ben presto l'occasione di notare l'importanza delle ripercussioni: *Magia Naturalis* è stato un libro straordinariamente fortunato e diffuso. Ne furono fatte ventitré edizioni dell'originale latino, dieci traduzioni italiane, otto francesi, ed altre spagnole, olandesi ed anche arabe. La prima, scritta quando l'autore aveva 23 anni (nel 1558) era composta di quattro « libri », ossia parti. Quella che ci interessa di più è del 1589. I libri sono saliti a venti; nel XVII, dedicato alle « magie » ottiche, si parla delle « lenti cristalline ».

La *Magia Naturalis* non è un libro serio; è una raccolta di scherzi, di giuochi, di trucchi, di magie. Ecco perché il Porta ha creduto bene di includervi le lenti. Ma questa citazione ha avuto delle conseguenze di una portata grandiosa, a cui certamente l'autore non pensava neanche lontanamente.

Il contenuto del XVII Libro della *Magia* è stato da noi analizzato minutamente in un'altra sede [19]: ora ci limitiamo a riportare gli elementi che hanno attinenza al nostro argomento. I quali sono tre.

Il primo è nel Capitolo VI, e consiste nella descrizione della « camera oscura » con lente all'orifizio, e nel paragone di questo dispositivo con l'occhio. Ecco il testo: « Ora poi renderò nota una cosa che ho sempre taciuto e che ho ritenuto di dover tacere. Se applicherai una lente di vetro al foro, vedrai tutte le cose più chiare, i volti degli uomini che camminano, i colori, le vesti, gli atti, e tutte le cose, e se li osserverai accuratamente, ne avrai tanto piacere, che chi li ha visti non ne aveva mai abbastanza di rimirarli » [20].

E poco sotto: « Di qui si fa manifesto ai filosofi e agli ottici in qual luogo avvenga la visione; e si dirime la questione, discussa da sì lungo tempo, dell'introduzione nell'occhio, questione che non

[19] V. Ronchi, *Galileo e il cannocchiale*, Idea, Udine 1942, pp. 47 e sgg.
[20] « ...Nunc autem enunciabo quod adhuc semper tacui, tacendumque putavi. Si chrystallinam lentem foramini appones, iam iam omnia clariora cernes, vultus hominum deambulatium, colores, vestes, actus, et omnia, ac si proprius spectares, videbis, tam maxima iucunditate, ut qui viderint, nec unquam satis mirari possunt... », Giovan Battista Della Porta, *Magia Naturalis*, Salviani, Napoli 1589, Libro XVII, Cap. VI.

potrà esser dimostrata con nessun altro artificio. Il simulacro entra per la pupilla, come attraverso il foro della camera oscura, e la lente sferica in mezzo all'occhio tiene il posto dello schermo; cosa che so riuscire molto gradita alle persone acute »[21].

Anche il Cardano aveva applicato la « lente di vetro » al foro della camera oscura; ma ben pochi lo sapevano, perché ben pochi leggevano i suoi scritti. La grande diffusione della *Magia* del Porta invece divulgò la notizia in tutte le parti del mondo, e il Porta stesso è stato sempre considerato l'inventore di questo dispositivo.

Anche il confronto tra la camera oscura e l'occhio era già stato fatto da Leonardo, come abbiamo visto; ma la nota relativa giaceva in un manoscritto sepolto, che verrà riesumato diversi secoli più tardi; mentre il richiamo del Porta doveva attirare sulla questione l'interessamento di chi era in grado di risolverla definitivamente.

Questo lo vedremo fra breve. Passiamo al secondo punto importante del XVII Libro della *Magia.* Il Cap. X è dedicato alle « lenti ». Lo dice il titolo: *De crystallinae lentis effectibus.* L'interessante, per noi, qui sta soprattutto nella *presentazione*: dopo aver specificato che vi sono lenti concave e convesse, il Porta nota esplicitamente che gli effetti delle lenti sono necessari per la vita umana e che a proposito di esse nessuno ha sviscerato ancora né questi effetti né le regioni: « ... idem sunt et specillorum effectus, qui maxime ad humanae vitae usum sunt necessarii, quorum adhuc nemo neque effectus, neque rationes attulit ».

Compare qui la parola « specillum » con cui il mondo dotto indicò le lenti, quando cominciò a parlarne; e questa parola conferma la nostra osservazione, fatta alla fine del Capitolo precedente, circa la volgarità del nome « lente » e della dimostrazione fornita da questo nome circa l'origine artigiana degli occhiali.

Il Porta nella *Magia* usa quasi sempre il termine « lens crystallina », perché appunto quest'opera non aveva mire scientifiche, ma era dedicata al pubblico vario; egli stesso riprese lo studio delle lenti in un'altra opera di soli quattro anni dopo, e questa volta

21 « ... Hinc Philosophis et opticis patet, quo nam fiat visio loco, ac intromittendi dirimitur quaestio, sic antiquibus exagitata, nec alio utrumque artificio demonstrare poterit. Intromittitur idolum per pupillam, fenestrae foraminis instar, vicemque obtinet tabulae crystallinae sphaerae portio in medio oculi locata, quod scio ingeniosis maxime placiturum... ».

con intenti seri[22]. Naturalmente allora usò soltanto il termine nobile e ampolloso di « specillum ».

A parte questa nota filologica, l'interesse della presentazione sopra riportata sta nell'accusa che il Porta lancia senza mezzi termini contro l'ambiente della scienza, di non aver saputo dar ragione del funzionamento delle lenti; e non solo di non averne saputo spiegare gli effetti, ma anche di non averli esaminati e indagati.

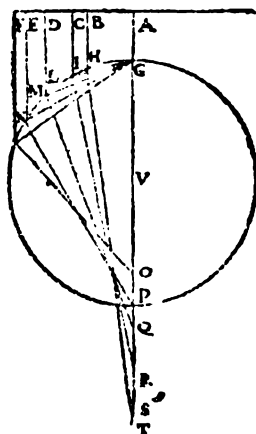



Fig. 6 La « pila crystallina » nel *De Refractione*.

È la prima volta, dopo più di tre secoli, che uno osa lanciare quest'accusa in un libro stampato. Anche quest'accusa, data la grande diffusione dell'opera, ebbe effetti immediati.

Il terzo brano che ci piace riportare, ancora dal Capitolo X del Libro XVII della *Magia* è quello famoso che secondo molti doveva essere la ricetta costruttiva del cannocchiale a oculare divergente: « ... Le lenti concave fanno vedere chiarissimamente le cose lontane; le lenti convesse quelle vicine; onde potrai usufruire di esse per comodità della vista. Con la lente concava vedi lontano le cose piccole, ma nitide, con quella convessa più grandi le cose vicine,

[22] Il già ricordato *De Refractione*, su cui torneremo fra breve.

ma confuse; se saprai comporre giustamente le une e le altre, vedrai ingrandite e chiare e le cose lontane e quelle vicine... »[23].

Come abbiamo dimostrato nella nostra analisi già citata, questo brano, che preso isolato può far ritenere sicuro che il Porta avesse messo insieme un cannocchiale del tipo oggi detto galileiano, quando lo si esamini nel pieno contesto del discorso in cui è inserito risulta soltanto una ricetta di occhiali per correggere difficili difetti visivi, che a quel tempo non erano definiti e spiegati dagli ottici.

Ma anche di questa ricetta vedremo presto le conseguenze.

Si comprende facilmente che l'aver parlato di lenti e di visione e di camere oscure in un libro che ha avuto una diffusione così strepitosa ha rotto definitivamente la « congiura del silenzio » con cui l'ambiente della cultura fino ad allora si era difeso dal pericolo delle lenti. Ormai l'accusa era lanciata e la « scienza » non poteva più tirarsi indietro.

Il Porta stesso tentò di rispondere, e questa volta da scienziato, in un altro libro, molto interessante per noi ma pochissimo conosciuto anche ai suoi tempi: il *De Refractione* già ricordato nelle pagine precedenti. Fu pubblicato nel 1593, quattro anni dopo l'edizione della *Magia* da cui abbiamo tolto le citazioni qui sopra. Ed è molto interessante, perché è il primo libro in cui si tenti di fare la teoria delle lenti.

L'autore si occupa a fondo della rifrazione della luce; sia attraverso una superficie piana, sia attraverso una sfera di vetro (la solita « pila crystallina »), sia attraverso una semisfera di vetro (che egli chiama «convexa sphaeralis superficies »), sia attraverso ciò che rimane da una lamina a facce piane e parallele, quando vi si toglie una semisfera di vetro: cioè una lente piano concava di grandissima apertura, che egli chiama « concava sphaeralis superficies ». Studia anche l'occhio, il meccanismo della visione, specialmente di quella binoculare, mettendo in evidenza una quantità

[23] « Concavae lentes, quae longe sunt clarissime cernere faciunt, convexae propinqua; unde ex visus commoditate his frui poteris. Concavo longe parva vides, sed perspicua, convexo propinqua maiora sed, turbida, si utrumque recte componere noveris, et longinqua, et proxima maiora et clara videbis... », Giovan Battista Della Porta, *Magia Naturalis* cit., Libro XVII, Cap. X.

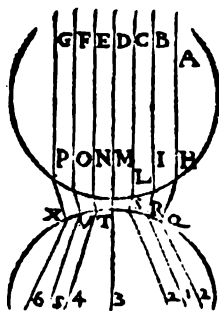



Fig. 7 La lente biconvessa nel *De Refractione.*

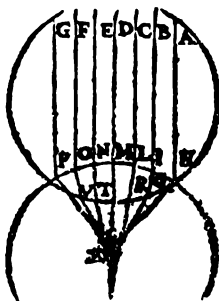



Fig. 8 La lente biconcava nel *De Refractione.*

di problemi a cui né lui né altri allora sapevano dare una risposta, e infine, nel Libro VIII, tenta di fare la teoria delle lenti convesse e concave. Col Libro IX, dedicato ai colori e all'arcobaleno, si chiude questo prezioso volumetto.

A parte l'interesse del primato storico di questa trattazione delle lenti, tutta l'opera ha per il nostro argomento un valore notevolissimo, perché il Porta utilizza le concezioni dell'ottica allora imperante e tenta di applicarle alla spiegazione dei nuovi ordigni e delle nuove esperienze. In questo tentativo, che egli presenta come un successo, egli dimostra una cosa sola: che le concezioni classiche erano assolutamente insufficienti e inadatte allo scopo.

Come abbiamo visto nel Capitolo precedente, l'Alhazen aveva

lanciato l'idea geniale di *elementarizzare l'oggetto*, di considerarlo cioè come un complesso di elementi, ciascuno dei quali lanciava la sua specie puntiforme lungo un raggio, fino a penetrare entro la pupilla e a raggiungere il cristallino; e proprio con questo meccanismo aveva superato il grande ostacolo che aveva torturato le menti dei fisici antichi, incapaci di far entrar dentro la piccola pupilla le specie degli oggetti grossi. Ma l'idea dell'Alhazen non era stata apprezzata in pieno dagli ottici dell'occidente, che avevano fatto ogni tentativo per conciliarla con la concezione sintetica classica, giungendo a delle conclusioni grottesche addirittura. Ogni oggetto doveva ancora emettere la sua specie, il suo simulacro tutto intero; forse sembrava assurdo che la specie di un uomo dovesse dividersi nelle specie delle sue braccia, delle sue gambe e delle altre sue parti, come se in questa anatomizzazione la specie stessa venisse a perdere la sua « vita ». I raggi del *lumen* guidavano queste specie entro l'occhio che guardava l'oggetto.

Simili concezioni potevano esser benissimo pensate, quando si trattava di guardare direttamente a occhio nudo un oggetto. Ma le cose non andavano più tanto lisce quando intervenivano fenomeni di riflessione e di rifrazione dei raggi.

Come si è visto, finora il problema, che già si era presentato per il semplice specchio piano e anche per quelli curvi, era stato risolto in una maniera molto semplice: non parlandone più. Ma ora quel guastafeste del Porta lo riprende e lo agita, mettendo in evidenza, senza volerlo, tutte le assurdità che seguivano dalle spiegazioni possibili secondo gli schemi dell'ottica classica.

Esaminiamo la cosa un po' nei particolari.

Da quello che ora abbiamo riassunto, sarà facile rendersi conto del significato della prima « Definizione » con cui si apre l'opera del Porta: « La linea incidente è quella per cui arriva la luce della sorgente o fluisce il simulacro attraverso una sostanza trasparente » [24]. L'autore cioè considera due casi: uno, di un corpo luminoso (praticamente costituito dal Sole) che manda il suo *fulgor*, generalmente detto *lumen*; l'altro, di un corpo illuminato, che emette il suo simulacro. Ebbene tanto il *fulgor* quanto il simulacro procedono lungo la « linea incidente » (si noti bene il sin-

[24] « Linea incidens est per quam fulgor luminosi emicat, vel simulachrum per medium unius diaphani fluit » (Giovan Battista Della Porta, *De Refractione*, Cantini, Napoli 1593, Libro I).

golare), ossia quello che oggi si dice « raggio incidente ». Cioè la linea incidente non è un elemento di luce o di immagine, ma è soltanto la *direzione* lungo la quale corrono il *fulgor* o il simulacro, come lungo una guida o un binario.

La seconda « Definizione » dice: « La linea rifratta è quella per cui si propaga il raggio o l'immagine nel secondo mezzo di diversa trasparenza » [25]. Il *raggio* corrisponde al *fulgor* della prima Definizione, così come l'« immagine » corrisponde al simulacro. Ecco apparire la parola *immagine*, fonte di tante complicazioni.

Come si possa parlare di rifrazione, con queste premesse fondamentali, oggi non si capisce. Il Porta non se ne preoccupa, e va avanti imperturbabile, con l'aria di dire delle cose serie e inequivocabili. Varrebbe la pena di riportare molti dei ragionamenti fatti in questo libro (e si tratta ancora della rifrazione attraverso una superficie piana soltanto), perché insegnerebbero molte cose, anche sul modo di ragionare; ma ci limitiamo a qualche esempio saliente.

L'autore studia i fenomeni che si presentano quando un corpo immerso nell'acqua viene osservato dal di sopra, obliquamente. Egli conclude che lo si vede come avvicinato alla superficie dell'acqua, e spiega questa apparenza invocando la rifrazione del raggio che dal corpo va alla superficie non normalmente (l'osservatore è supposto di fianco), ma obliquamente, e che uscito nell'aria si flette, appunto per rifrazione, verso la superficie liquida (oggi si dice: allontanandosi dalla normale alla superficie di separazione dell'acqua dall'aria). Poi si trattava di esprimere il concetto che la figura che si vede è sul prolungamento nell'acqua, del raggio rifratto nell'aria. Lo sapevano in molti, allora, che le cose andavano così; ma il bello stava a dirlo coi termini dell'ottica di allora.

Vediamo come se la cava il Porta.

Il titolo della seconda Proposizione è: « Un oggetto visto sotto un mezzo più imperfetto dell'aria, se è perpendicolare penetra in questo più energicamente; invece se è obliquo si allontana dalla perpendicolare ». La traduzione del testo latino è assai difficile [26], ma crediamo di aver reso fedelmente, se non elegantemente, il

[25] « Linea refracta est per quam radius, vel imago per alterum imparis perspicuitatis diaphanum effunditur ».

[26] « Res visa sub hebetiori aeris corpore perpendicularis penetrat robusta, obliqua vero a perpendiculari recedit ».

pensiero dell'autore. Il quale dunque si esprime in un modo particolarmente interessante: l'oggetto (si noti bene) visto sott'acqua penetra robustamente (cioè senza deviare) nell'aria, quando è perpendicolare; si allontana dalla perpendicolare, quando esce dall'acqua obliquamente. A parte che la frase « oggetto perpendicolare » indica un modo di parlare assai scorretto geometricamente, il significato fisico di quello che l'autore ha scritto sarebbe il seguente: se un occhio guarda un oggetto sott'acqua, secondo una visuale normale alla superficie, l'oggetto salta fuori diritto e entra nell'occhio: se invece uno lo guarda secondo una visuale obliqua, l'oggetto salta fuori, ma si allontana dalla perpendicolare.

È evidente che il Porta non voleva dire che proprio l'oggetto veniva fuori dall'acqua; ma non si tratta di un semplice svarione, o di un modo di dire abbreviato e convenzionale: il bello stava a descrivere il fenomeno in altra maniera. Come si vede anche in altre Proposizioni.

Così la IV Proposizione dice: « L'immagine rifratta, dell'oggetto, correndo verso l'occhio, non si vede al suo posto » [27]. Qui le cose cambiano. Chi corre verso l'occhio è l'« imago », l'immagine, non l'oggetto, e ciò è già un passo avanti. Ma di passi avanti da fare ce ne sono ancora molti, perché quest'immagine rifratta che va verso l'occhio (e con la velocità della luce!) dove si dovrebbe vedere? Dentro l'occhio? Il Porta si limita a dire che non si vede al *suo* posto. Secondo le regole latine, quel *suo* si dovrebbe riferire al soggetto, cioè all'immagine; ammettiamo pure che si tratti di un erroruccio di sintassi (non sarebbe l'unico del libro) e che l'autore abbia voluto dire, più giustamente, che l'immagine non si vede al posto dell'oggetto; ma è sempre un bel guazzabuglio.

La Proposizione seguente conferma la confusione generale: « L'immagine rifratta arriva all'occhio lungo linee diritte » [28]. Ne segue un bel rebus: quando le linee incidenti attraversano la superficie rifrangente si spezzano, ché in ciò consiste appunto la rifrazione: i simulacri seguono la linea incidente e la linea rifratta, almeno secondo la I e la II Definizione, sopra riportate; ma poi il simulacro finale, che arriva all'occhio, vi arriva secondo una linea diritta, cioè non spezzata alla superficie. È un bel rompicapo!

Evidentemente il meccanismo della visione della scienza d'allora

[27] « Imago rei refracta visui occurrens, suo loco non videtur ».
[28] « Imago refracta ad visum pervenit per rectas lineas ».

era messo a una prova superiore alle proprie capacità e mostrava la sua insufficienza in modo stridente. Il Porta pare che non se ne accorga e va avanti imperturbabile. Naturalmente quando passa alle superficie curve, e alle lenti, lo stridore arriva alle stelle. Crediamo inutile insistere in esemplificazioni, ché è facile immaginarlo dopo gli esempi riportati a proposito delle superfici piane.

Si sente in tutta questa trattazione che il connubio fra immagine e raggio, come è postulato, è assurdo. La concezione basilare della luce, o meglio del *lumen*, che dalle sorgenti luminose va sugli oggetti secondo raggi rettilinei (riflessibili e rifrangibili) ne provoca il distacco delle immagini o dei simulacri e quindi li guida negli occhi di chi li guarda, è inadatta a descrivere ciò che avviene nella rifrazione, come lo era stato per descrivere ciò che avviene nella riflessione. Il fatto che non serva mai, altro che per spiegare ciò che avviene nella visione diretta, quando non vi è nessuna complicazione, porta a concludere che essa è falsa e deve esser sostituita.

Si può dire che ancora all'ottica mancava una luce atta a rappresentare le immagini ottiche.

Ma ormai gli eventi precipitano.

Quando il Porta scriveva gloriosamente le sue assurdità circa la rifrazione e le lenti, già da tre anni, nel 1590, gli oscuri occhialai avevano messo insieme il primo cannocchiale ad oculare divergente. Il fatto che ciò avvenisse proprio l'anno dopo di quello in cui fu pubblicata l'edizione della *Magia Naturalis* col XVII Libro sulle lenti, e con la famosa ricetta sopra riferita, rende molto probabile che il cannocchiale fosse costruito proprio interpretando male quella ricetta; tanto più che esso fu composto in Italia.

Di questo primo esemplare di cannocchiale si sa soltanto che emigrò in Olanda, dove quattordici anni più tardi ricomparve, nelle mani di altri occhialai del luogo. Non è sulla storia, tanto discussa, dell'invenzione di questo strumento che ora ci vogliamo soffermare: ma tra breve dovremo notarne le profonde ripercussioni su tutta l'ottica in generale.

Nello stesso anno in cui gli occhialai olandesi iniziarono la costruzione dei cannocchiali, vide la luce un'opera degna di molta attenzione, composta da uno scienziato di alta levatura, che rispondeva al nome di Giovanni Keplero [29]; opera che contribuì in larga

[29] Johann Kepler, o Keppler, nacque a Dorf Magstaff, presso Weil nel Würtemberg, nel 1571, e morì nel 1630 a Regensburg.

misura all'affermazione dell'ottica nuova che già si era delineata all'orizzonte nel secolo precedente.

Nel 1604, e cioè solo undici anni dopo la pubblicazione del *De Refractione* del Porta, esce il volume *Ad Vitellionem Paralipomena*, in cui il Keplero, sotto un titolo così modesto, espone molti concetti fondamentali. L'opera consta di undici Capitoli, di cui però gli ultimi sei sono dedicati a questioni astronomiche. I primi cinque Capitoli riguardano la natura della luce, i fondamenti della riflessione, la localizzazione delle immagini, la misura della rifrazione e il meccanismo della visione.

Tutti questi argomenti sono trattati in una maniera organica, con principii del tutto diversi da quelli dominanti nella scienza dell'epoca. Il Keplero riprende le idee dell'Alhazen, (e il titolo dell'opera esprime questa ripresa molto sinteticamente) e le sviluppa nella loro essenza genuina, senza cercare alcuna conciliazione o adattamenti con modelli dell'ottica antica. Svincolato così da concezioni che, per quanto bimillenarie, tuttavia ogni giorno di più ormai apparivano esaurite ed assurde, egli può procedere razionalmente e logicamente ad una nuova organizzazione del grande complesso luce-immagini-visione.

Vediamo come egli ci presenta questa mirabile costruzione. Il primo Capitolo è dedicato alla luce (*De natura lucis*). I titoli delle prime quattro Proposizioni sono i seguenti:

I: « Alla luce compete la proprietà di effluire o di esser lanciata dalla sua sorgente verso un luogo lontano ». (« Luci effluxus vel eiaculatio competit a sua origine in locum distantem »).

II: « Da un punto qualunque l'efflusso della luce avviene secondo un numero infinito di rette ». (« Punctum quodlibet infinitis numero lineis effluit »).

III: « La luce in se stessa è atta ad avanzare fino all'infinito ». (« Lux se ipsa in infinitum progredi apta est »).

IV: « Le linee di queste emissioni sono rette, e si chiamano *raggi* ». (« Lineae harum eiaculationum rectae sunt, dicantur radii »).

In queste quattro Proposizioni risulta definito così il raggio luminoso, che sarà poi adottato definitivamente dall'ottica geometrica.

Si noti che, contrariamente alle consuetudini del tempo, il Keplero usa sempre il termine « lux » e non quello di « lumen ». In seguito fa un fugace accenno a questa distinzione, ma non l'adotta

mai. Essa distinzione aveva una ragion d'essere molto profonda, come quella fra causa ed effetto: anzi addirittura fra una causa e un effetto non legati necessariamente e indissolubilmente, ma collegati attraverso un processo psicologico ancora misterioso. All'inizio, questa connessione incerta costituiva un impaccio grave, e l'averla resa rigida immedesimando addirittura la causa con l'effetto è stata una semplificazione preziosa; purtroppo questo unico agente che il Keplero ha chiamato senz'altro « lux », nei secoli successivi ha continuato ad essere indicato con un termine solo (nelle lingue moderne esistono le parole corrispondenti a « lux », come *luce, light, luz, lumière, licht*, ma non esiste alcun termine che traduca « lumen »; soltanto in questi ultimi tempi si è tentato di far entrare nell'uso la parola *radiazione*), non certo con beneficio della chiarezza delle idee.

Le Proposizioni seguenti, ben trentaquattro, in questo primo Capitolo, riassumono le proprietà fisiche della luce, e le sue relazioni col colore.

Per quanto al principio del 1600 le cognizioni fisiche fossero ben più sviluppate che non venti secoli prima, non si aveva ancora la possibilità di coordinarle organicamente in un modello plausibile, cosicché ancora per il Keplero possiamo ripetere quello che già abbiamo osservato a proposito di Euclide: mentre il contenuto geometrico delle sue costruzioni rappresenta una conquista definitiva e imperitura, l'incrostazione fisico-fisiologica risente molto della modestia del materiale sperimentale e riesce incoerente e caduca.

La « luce » del Keplero ha velocità infinita [30]; man mano che si allontana dalla sorgente si attenua, perché si ripartisce sopra un'area maggiore, ma non si attenua nella direzione propria di un unico raggio; un raggio di luce è puro moto, e non ha consistenza; mentre la luce che si muove è una superficie. Questa idea strana, che la luce sia un'entità a due dimensioni, mentre sembra un'intuizione profetica di quello che oggi si chiama « fronte d'onda luminosa », non può dirsi una trovata plausibile. La Proposizione VIII è esplicita in proposito: sotto il titolo « Il raggio di luce non è niente della luce stessa che si propaga », l'Autore spiega: « Infatti il raggio, per la IV Proposizione, non è altro che il moto stesso della luce. Proprio come nel moto fisico, il moto è una linea retta, ma

[30] « Lucis motus non est in tempore, sed in momento » (Giovanni Keplero, *Ad Vitellionem Paralipomena,* Francoforte 1604, p. 9).

l'ente fisico che si muove è un corpo; così nella luce il moto è pure una linea, e ciò che si muove è una certa superficie »[31].

Il Keplero descrive quindi la trasparenza dei corpi « perspicui » ossia limpidi, e quella dei corpi « pellucidi », ossia diffondenti; l'opacità dei corpi molto densi; e passa quindi a definire il colore: « Il colore è luce in potenza, luce sepolta nella materia pellucida »[32]; nelle proposizioni successive precisa che la luce è incolore e si colora quando viene riverberata da un corpo colorato. Perché la luce si riflette e si rifrange, cioè i raggi quando incontrano una superficie si troncano, ma poi riprendono la loro forma rettilinea. Anche quando attraversa i corpi la luce si colora, e tanto più intensamente, quanto più grande è lo spessore attraversato; e se attraversa mezzi di colori diversi, ne esce con un colore nuovo.

Se uno stesso corpo è illuminato con due luci di intensità molto diversa, quella più debole non viene sentita affatto; i corpi bianchi fanno vedere le luci colorate che li illuminano meglio di quelli neri. La luce poi è calda[33]; il suo calore non è materiale, ma riscalda la materia, almeno in un certo tempo. Perciò la luce distrugge e brucia i corpi, e a lungo andare li scolora. Queste azioni termiche sono più intense sui corpi neri che su quelli bianchi[34].

Come si vede, i fenomeni propri della luce ora descritti sono molto più numerosi e definiti che non nella letteratura precedente. I concetti geometrici sono pure più definiti e progrediti; e se le due cose fossero state tenute distinte, non potevano che riscuotere l'ammirazione generale. Il tentativo di conglobar tutto in un modello unico non si può dire riuscito. Ma ciò non ha molto interesse per il seguito dell'opera, perché in realtà tutte queste proprietà fisiche della sua luce il Keplero non le utilizza più, e solo si serve delle leggi della riflessione e del fenomeno della rifrazione. Proprio come si fa oggi nell'ottica geometrica.

Il Keplero chiude il primo Capitolo della sua opera con una minuziosa contestazione delle proprietà della luce e della sua na-

[31] « Lucis radius nihil est de luce ipsa egrediente. Nam radius per IV. nihil aliud est nisi ipse motus lucis. Sane ut et in motu physico, motus ipsius est recta linea, physicum vero mobile, est corpus: ita in luce motus ipse est recta itidem linea, mobile vero, est superficies quaedam », ivi, p. 9.

[32] « Color est lux in potentia, lux sepulta in pellucidi materia... », ivi, p. 11.

[33] « Lucis proprium est calor », ivi, p. 25.

[34] « Lux nigra facilius inflammat quam alba », ivi, p. 28.

tura, come erano state esposte da Aristotele e ancora accettate dai suoi numerosissimi seguaci.

Nel Capitolo seguente i raggi vengono applicati alla spiegazione della camera oscura, che il Keplero dichiara recisamente di aver appreso dalla *Magia Naturalis* del Porta. Vengono anche applicati alla spiegazione delle « macchie di Sole » rotondeggianti che si vedono sotto il fogliame degli alberi e che aveva costituito un arduo problema per i fautori delle specie.

Nel Capitolo terzo si trova una delle conquiste teoriche più importanti del Keplero. Perché quando si guarda in uno specchio piano si vedono dietro di esso le figure degli oggetti posti davanti? Il Keplero riassume i tentativi di spiegazione di questo misterioso fenomeno da parte dei predecessori e ne mette in evidenza l'insufficienza. Passa quindi alla parte costruttiva, sotto il titolo: « Vera dimostrazione ». E comincia: « Per spiegare la vera causa della localizzazione delle immagini, la cui ignoranza è una brutta macchia in una scienza bellissima, ... » [35], bisogna considerare la figura che si vede come un ente « intenzionale », cioè soggettivo, collocato dall'occhio dell'osservatore; il quale occhio riceve i raggi, e in base alla struttura di questi deduce dove si deve trovare l'oggetto che li ha emessi. Il Keplero considera prima la visione con due occhi e mostra come la convergenza delle loro visuali porti a individuare la posizione del punto raggiante, notando che si fa una vera e propria triangolazione. Poi passa a considerare un occhio solo, mette in evidenza il « triangolo misuratore » (« triangulum distantiae mensorium ») costituito da due raggi uscenti da un punto raggiante e diretti verso gli estremi di un diametro della pupilla, e da questo diametro come terzo lato, e dimostra che questo triangolo dà alla mente dell'osservatore quanto occorre per localizzare nel suo vertice acuminato il punto osservato.

È chiaro che se i raggi hanno conservato la loro struttura rettilinea la figura si vede al posto dell'oggetto; se per via sono stati piegati, la figura si vede in un luogo dove l'oggetto non è.

Questo ragionamento, la cui limpidezza risalta ancor più se lo si confronta con la confusione dei discorsi del Porta nel *De Refractione*, ha portato nella teoria delle immagini ottiche, ottenute

[35] « 2. Vera Demonstratio. Ut igitur veram causam loci imaginum patefaciam, cuius ignoratio macula foeda est in pulcherrima scientia... », ivi, p. 64.

sia per riflessione, sia per rifrazione, una chiarificazione incalcolabile. È stata una conquista definitiva.

Alla misura della rifrazione il Keplero dedica l'intero quarto Capitolo, con ampie divagazioni circa la rifrazione atmosferica e la storia di sì complesso fenomeno. Nonostante molte misure fatte, non arriva a trovare una legge generale, ma si limita a concludere che, per angoli inferiori a 30 gradi, l'angolo d'incidenza e quello di rifrazione si potevano considerare proporzionali. È in fondo la legge che ancor oggi si utilizza nell'ottica geometrica elementare.

Il Capitolo quinto contiene un'altra grande conquista del Keplero. È intitolato *De modo visionis*, e dopo una accurata esposizione della struttura anatomica dell'occhio, viene a dichiarare: « Dico che la visione si ha quando l'immagine di tutto l'emisfero del mondo che è davanti all'occhio, e anche un po' di più, si forma sulla superficie cava rossastra della retina » [36]. Per la prima volta, dopo duemila anni di discussioni e di studi, non si ha ritegno a far pervenire direttamente lo stimolo luminoso sulla retina.

Il Keplero aggiunge subito che lascia ai « fisici » il compito di definire che cosa succede dopo, cioè da quando l'immagine degli oggetti è penetrata nella retina a quando viene elaborata dalla « facoltà visoria » o dall'« Anima » fino alla visione definitiva. Oggi le persone che si interessano di questo processo non si chiamano più fisici, ma fisiologi e psicologi; però questo ha poca importanza. L'interessante è che il Keplero supera finalmente il preconcetto circa il rovesciamento dell'immagine sul fondo dell'occhio; cioè il preconcetto che aveva indotto i predecessori, sull'esempio dell'Alhazen, a considerare come superficie sensibile quella del cristallino rivolta verso la pupilla. Il Keplero riconosce che la figura proiettata sulla retina è capovolta, ma non considera dannoso questo rovesciamento, perché dal momento che la localizzazione delle figure fuori dell'occhio è fatta dall'occhio stesso, essa può esser collegata con una legge o con un'altra alla distribuzione degli stimoli sulla retina. La regola ora risulta la seguente: quando lo stimolo sul fondo dell'occhio è in basso, la figura fuori deve essere vista in alto, e viceversa; e quando lo stimolo è a destra, la figura esterna deve essere vista a sinistra e viceversa. Regola altrettanto semplice e ragionevole

[36] « Visionem fieri dico, cum totius hemisphaerii mundani, quod est ante oculum, et amplius paulo, idolum statuitur ad album subrufum retinae cavae superficiei parietem... », ivi, p. 168.

quanto quella che obbligasse a vedere in alto le figure corrispondenti a stimoli della parte superiore della retina, e a destra quelle corrispondenti a stimoli della parte destra della retina.

Ma l'opera del Keplero non si è limitata a far giungere l'immagine degli oggetti esterni alla retina, superando il preconcetto del rovesciamento di questa immagine. Egli ha portato all'evidenza che le cose dovevano essere proprio così, considerando i coni di raggi col vertice nei diversi punti di un oggetto e con base comune a tutti sulla pupilla (i coni, cioè, le cui sezioni assiali erano state chiamate « triangoli misuratori delle distanze ») e segue la rifrazione

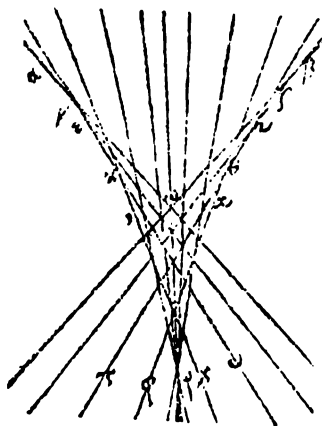



Fig. 9 Rappresentazione del concetto che i raggi centrali convergono in un punto mentre quelli marginali sono aberranti (p. 194 dei *Paralipomena*).

di questi raggi attraverso la cornea e il cristallino e dimostra che ognuno di essi coni si trasforma, per rifrazione, in un altro cono che ha la stessa base nella pupilla e ha il vertice sulla retina.

Anche questa è stata una chiarificazione fondamentale, che ha lasciato decisamente indietro l'ottica delle « specie »; si ha ora una limpida corrispondenza tra i punti dell'oggetto e quelli dell'immagine sulla retina, al posto di quel vago e confuso guazzabuglio di frasi senza contenuto di cui il Porta era stato così generoso.

Per dimostrare particolareggiatamente la trasformazione dei coni divergenti in quelli convergenti, il Keplero considera la « pila », cioè la palla o sfera, non già « cristallina », ma « acquosa », e studia il suo effetto sopra il cono di raggi provenienti da un punto dell'oggetto.

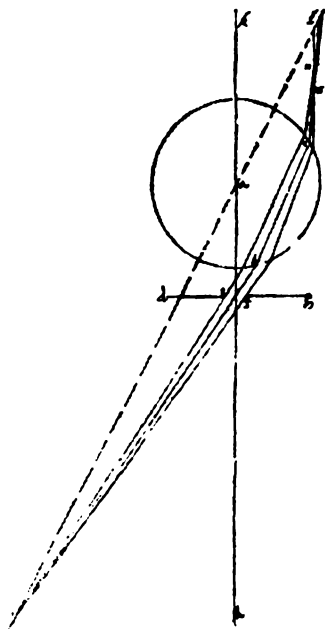



Fig. 10 - Dimostrazione dell'utilità della pupilla dell'occhio (p. 197 dei *Paralipomena*).

Egli prende le mosse dagli studi del Porta, che viene citato frequentemente, anche con la riproduzione di brani testuali, e dapprima esegue le sue esperienze osservando ad occhio attraverso le sfere, ma ben presto riconosce che non è la stessa cosa guardare le immagini « pendulae » cioè sospese per aria, o raccoglierle sopra uno schermo, e per rappresentare questa distinzione giunge al punto di indicarle con nomi diversi: « imagines rerum » le prime viste ad occhio e « picturae » quelle sullo schermo [37].

[37] « Definitio. Cum hactenus Imago fuerit Ens rationale, iam figurae rerum vere in papyro existentes, seu alio pariete, picturae dicantur », ivi, p. 193.

L'aver messo in disparte l'occhio dell'osservatore, con tutte le sue complicazioni psicologiche, ha costituito un'altra innovazione di

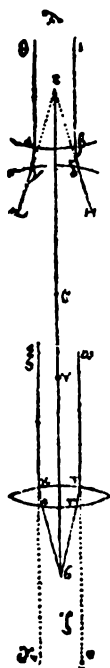



Fig. 11 - Spiegazione dell'effetto delle lenti da occhiali (p. 202 dei *Paralipomena*).

grande utilità, per venire a capo della complicata matassa della formazione delle immagini ottiche.

Ora il Keplero definisce l'« asse » della sfera, e studia la rifrazione dei vari raggi che la tagliano a diversa distanza da quest'asse, applicando la regola approssimata, data prima, per la rifrazione. Egli nota che di tutto il fascio di raggi, rifratti dalla sfera, quelli più vicini all'asse vanno a passare per uno stesso punto, mentre quelli periferici se ne discostano assai (fig. 9). Pone una « fenestella », cioè un diaframma, davanti alla sfera, perché funzioni da pupilla,

e osserva che « l'immagine sullo schermo è capovolta, ma è purissima al centro e nitidissima »[38] (fig. 10).

Il cammino verso l'ottica nuova procede di conquista in conquista, con logica necessaria. La « pila » di grandissima apertura angolare cede il posto alla sfera strettamente diaframmata, e i fasci di raggi intrecciati, complicati, inestricabili sono limitati alla loro parte essenziale, ordinata e preponderante, in modo che possono esser considerati conici. Dunque a un punto oggetto ora, finalmente, corrisponde un *punto* immagine, vertice del cono di raggi che hanno attraversato la sfera, *diaframmata* strettamente.

Ciò permette al Keplero di studiare la visione per vicino e per lontano e di spiegare perché i presbiti, muniti di lenti convesse, che aumentano la convergenza dei coni di raggi, vedono bene le cose vicine, e perché ai miopi per vedere da lontano occorre anteporre agli occhi lenti concave (fig. 11).

Il Capitolo VI dei *Paralipomena* termina con la storia degli studi sul meccanismo della visione; e in questa sede il Keplero dà al Porta il merito che gli spetta, riconoscendo in lui il suo ispiratore; riporta testualmente il brano del Cap. VI del Libro XVII della *Magia Naturalis*, in cui il Porta afferma di aver risolto la questione del come i simulacri entrino nell'occhio attraverso la pupilla, e dichiara di aver preso le mosse da tale studio, eliminandone i punti che aveva ritenuto errati.

In questo il Keplero sopravaluta l'opera del Porta, perché il suo apporto non era una aggiunta, un perfezionamento di quello che aveva detto il predecessore, ma era una costruzione nuova, rivoluzionaria, infinitamente superiore: di fronte ad essa, ciò che aveva scritto il Porta diventava un cimelio da museo.

Col 1604 l'ottica cambia decisamente indirizzo. Però l'effetto immediato dell'opera di Keplero fu molto modesto. Data la enorme mole dell'ambiente colto, l'anzianità delle idee che lo dominavano, la tenacia e la fede con cui i numerosi e potenti peripatetici difendevano le loro teorie, che in ultima analisi facevano capo ad Aristotele, data anche la grande difficoltà dell'argomento, non deve riuscire strano se anche dieci anni dopo la pubblicazione dei

[38] « Pictura eversa est, sed purissima in medio, et distinctissima », ivi, p. 196.

Paralipomena il mondo colto parlava ancora il linguaggio del Porta, e dei classici, ed era ancora convinto che le specie e i simulacri portavano negli occhi le forme e i colori dei corpi esterni.

Però degli avvenimenti straordinari e clamorosi accelerarono molto l'evoluzione delle idee.

Perché, anche nei *Paralipomena*, accanto a tante meraviglie, deve esser rivelata una grave lacuna: delle lenti non se ne fa alcuna teoria. In un'unica paginetta se ne tratta di passaggio, considerandole come mezzi per aumentare la convergenza o la divergenza dei coni di raggi, e quindi correggere le ametropie visive. Punto e basta.

Anche per il Keplero, dunque, le lenti non presentavano alcun interesse ottico. È anzi interessante notare, a questo proposito, che ancora egli dichiara di aver preso le mosse dall'opera del Porta, il solo che abbia tentato di render ragione del funzionamento ottico delle lenti [39], e di essere debitore del risultato all'insistenza del signor Ludovico L. B. da Dietrichstein, che per tre anni lo ha interessato alle lenti da occhiali.

Ma le cose dovevano cambiare a breve scadenza.

Proprio nell'anno in cui furono pubblicati i *Paralipomena* gli occhialai olandesi di Middleburg cominciarono a mettere in circolazione dei cannocchiali, che, secondo le recenti dimostrazioni del De Waard, erano delle copie di quel primo campione italiano del 1590 [40].

Ora a noi non interessa la cronologia dell'invenzione del cannocchiale, ma interessa molto il fatto che alla sua comparsa esso incontrò la unanime disapprovazione da parte di tutto l'ambiente accademico, per le ragioni stesse per cui questo aveva dato l'ostracismo alle lenti da occhiali. Da un'ampia documentazione, raccolta nel nostro volume, già citato [41], risulta in modo indubitabile che gli ottici e i matematici, oltre che i filosofi, del principio del 600, all'oscuro del funzionamento delle lenti, non potevano a maggior ragione capire come funzionava il cannocchiale, e quindi riassumevano la loro valutazione del nuovo ordigno nel ragionamento tipico: « il cannocchiale fa vedere delle figure più grandi degli oggetti veri, o più vicine; le fa vedere colorate e deformate; dunque inganna e

[39] « Unus Baptista Porta professus est, rationem in opticis reddere: quae librariis frustra hactenus requisivi », ivi, pp. 200-1.

[40] Cfr. V. Ronchi, *Galileo e il cannocchiale*, Idea, Udine 1942.

[41] *Ibidem*.

non fa conoscere la verità. Dunque non può essere adoperato come strumento di osservazione ».

Il cannocchiale vivacchiò così vari anni. Gli occhialai tentavano di farne e di venderne, a pochi soldi, componendoli con lenti da occhiali qualunque, e facevano delle cose modestissime come qualità e come struttura. Il decorso dei fatti cambiò radicalmente soltanto cinque anni dopo, quando dello strumento si interessò un uomo che ha lasciato profonde tracce ovunque ha svolto la sua opera: Galileo Galilei [42].

Contrariamente a quella che è l'opinione generale, Galileo non si è mai occupato di ottica a fondo. Riguardo alla luce, egli stesso dichiara di « essere stato sempre in tenebre » circa la sua essenza [43]. Ciò ha costituito per lui una condizione di vantaggio, perché quando nel 1609, in seguito alle voci giunte al suo orecchio, rivolse l'attenzione al nuovo « cannone » che faceva vedere ingrandite e distinte le cose lontane, la sua mente non era ottenebrata dalla campagna di sfiducia e di diffidenza che l'ambiente della cultura sviluppava contro le lenti in particolare e contro tutti gli artifici ottici in generale.

Egli si dedicò alla costruzione di cannocchiali con le proprie mani e così ebbe modo di vedere che le lenti potevano esser buone e cattive, e che quando erano buone, lo strumento apriva delle possibilità sterminate alla ricerca scientifica e alla vita pratica.

Egli, per primo, modificò il famigerato ragionamento dei filosofi precedenti e contemporanei: è vero che il cannocchiale fa vedere delle figure diverse dalla realtà, in quanto le fa vedere più grandi o più piccole, più vicine o più lontane, colorate e confuse talvolta, ma non è detto che ciò sempre inganni, perché può anche darsi che dalle figure vedute nel cannocchiale la realtà si venga a conoscere meglio che ad occhio nudo. La prima cosa che occorre, perché questo effetto si possa ottenere, è che il cannocchiale sia « esquisito »; allora « può essere di giovamento inestimabile » [44].

Galileo per primo, nel mondo della cultura e della filosofia, giunse alla conclusione che si doveva *credere* in ciò che si vedeva nel

[42] Galileo Galilei nacque a Pisa nel 1565 e morì a Firenze-Arcetri nel 1642.

[43] Cfr. lettera di Galileo a F. Liceti, del 23 giugno 1640, Edizione Nazionale delle Opere di Galileo, 1937, n. 4025, p. 208.

[44] Cfr. lettera di Galileo al Doge Leonardo Donato, in data 29 agosto 1609, Edizione Nazionale delle Opere di Galileo, vol. X, n. 228, p. 250.

cannocchiale. Con questa premessa di ordine filosofico, egli rivolge il cannocchiale al cielo, e vi fa delle scoperte mirabili, che portano lo scompiglio nell'astronomia, nella fisica e nella medicina di allora. Quando egli le rese pubbliche in quel meraviglioso libretto che è il *Sidereus Nuncius*, suscitò una reazione di una violenza inaudita. Tutto l'ambiente accademico, con una unanimità impressionante, si schierò contro Galileo, accusandolo di dar importanza e di lanciare come vere delle osservazioni, che, essendo state fatte soltanto col cannocchiale, strumento fallace e misterioso, non potevano essere che illusioni e chimere. Pretendere di rivoluzionare la scienza con tali osservazioni era del tutto fuori di luogo.

Il Keplero, chiamato a dare il suo giudizio, per molto tempo tacque; quindi scrisse una lunga lettera che non diceva né di sì né di no; tentò di fare delle osservazioni, ma non riuscì a farsi un cannocchiale capace di vedere i satelliti di Giove e la maggior parte delle scoperte fatte da Galileo; soltanto nell'agosto del 1610, avendo potuto fare delle osservazioni con un cannocchiale costruito da Galileo e da questi inviato all'Elettore di Colonia, si rese conto della « verità » delle nuove scoperte, e scrisse a Galileo la famosa frase di Giuliano l'Apostata morente: « Vicisti, Galilaee! » (« Hai vinto, o Galileo! »).

D'allora in poi la vittoria di Galileo e del cannocchiale fu un fatto compiuto, senza mezzi termini, senza compromessi. Naturalmente ci volle qualche lustro prima che la grande massa del mondo accademico, con la sua inerzia inevitabile, assorbisse le nuove concezioni e cambiasse la sua mentalità. Ma il cambiamento fu così radicale, che l'ottica classica ne rimase definitivamente schiantata, e addirittura scomparve dalla faccia della Terra. Oggi la quasi totalità delle persone non può leggere un libro di ottica anteriore al '600, perché addirittura non è in grado di capirlo. Tutto è nuovo, tutto è cambiato. Tanto è stata profonda la catastrofe suscitata dall'affermazione del cannocchiale.

La documentazione di questa catastrofe, tanto importante e tanto poco conosciuta, oggi, è stata riunita nell'opera già più volte citata [45]. Ma chi vuol rendersi conto con maggiori particolari ancora della lotta all'ultimo sangue che la scienza cinquecentesca tentò di combattere contro il nuovo strumento, legga quell'interessantissimo libro

[45] V. Ronchi, *Galileo e il cannocchiale* cit.

che è la *Dianoia astronomica, ottica, fisica* di Francesco Sizi, cavaliere fiorentino, il quale in un'opera della massima serietà raccoglie tutti gli elementi per cui non si doveva credere in ciò che si vedeva nel cannocchiale.

Il Sizi, che rappresenta come il portavoce di tutti gli accademici dello Studio di Pisa e della Corte di Firenze, si rende conto della gravità della situazione, quando scrive: « infatti come le case si appoggiano ai fondamenti, così le scienze si fondano sui princìpi; disfatti e distrutti i quali, è necessario che la scienza, come la casa, cada » [46]. Egli termina la sua requisitoria contro il cannocchiale, ringraziando Iddio che gli aveva permesso di mostrare la verità, ed ha tutte le ragioni, ma con una piccola variante: egli aveva fatto molto per il trionfo della verità, ma la verità che trionfava era proprio quella che lui riteneva di aver demolito.

Il 30 agosto 1610 il Keplero inizia le osservazioni sul cielo col cannocchiale mandato da Galileo all'Elettore di Colonia; l'11 settembre 1610 pubblica la *Narratio de observatis a se quatuor Jovis satellitibus erronibus, quos Galilaeus Galilaeus Mathematicus Florentinus jure inventionis Medicea Sidera nuncupavit* (cioè « Descrizione dell'osservazione personale dei quattro satelliti erranti di Giove, i quali Galileo Galilei matematico Fiorentino, col diritto dell'invenzione, ha battezzato Pianeti Medicei »), nella quale riconosce ufficialmente che Galileo ha ragione; nello stesso mese di settembre egli consegna all'Elettore di Colonia, perché lo faccia stampare, il manoscritto della sua *Dioptrice*, che contiene la teoria delle lenti, fatta sullo stesso schema di quella già sviluppata nei *Paralipomena* a proposito della sfera di vetro o di acqua, e dell'occhio. In questo prezioso libretto è contenuta la teoria geometrica delle lenti, come si fa anche oggi, e vi è spiegato il cannocchiale astronomico, quello galileiano, e anche il principio del teleobbiettivo.

[46] « ... nam uti domus nituntur fundamentis, sic scientiae principiis fundantur, quibus collapsis et destructis, uti scientia cadat, sicuti domus, necesse est ». Sizi, *Dianoia astronomica, ottica, fisica*, Edizione Nazionale delle Opere di Galileo, vol. III, p. 212.

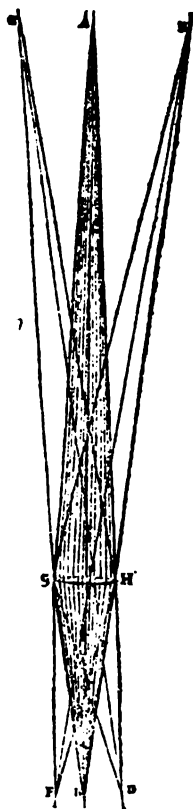



Fig. 12 - Teoria geometrica delle lenti, nella *Dioptrice* del Keplero.

Come si vede, se per quattro secoli le lenti non hanno avuto teoria, è stato l'effetto proprio dell'ostracismo che il mondo della scienza e della filosofia aveva applicato contro di loro. Da quando Galileo ha infranto questo ostracismo sono bastate delle settimane perché la teoria sia venuta fuori.

Abbiamo cercato, nelle pagine precedenti, di dare delle notizie sufficienti a valutare il contributo di quattro personalità tra il secolo XVI e il secolo XVII, alla catastrofe dell'ottica antica e alla affer-

mazione di un'ottica nuova, di cui si apprezzano dei caratteri tuttora presenti nell'ottica di oggi.

A Francesco Maurolico si dovrebbe riconoscere l'iniziativa di princìpi nuovi circa la luce, i colori e la visione, princìpi di cui fa uso ancora l'ottica moderna; ma non bisogna perdere di vista un particolare molto importante: il Maurolico non ha pubblicato niente al riguardo, e quindi non è facile definire come sia avvenuto che tali princìpi siano entrati nel patrimonio scientifico; il Porta ha avuto il grande merito di contribuire alla rottura della congiura del silenzio da parte dell'ambiente colto contro le lenti, e al tempo stesso di dimostrare, coi suoi tentativi falliti di fare un discorso serio utilizzando i canoni dell'ottica antica, che tale discorso era impossibile; Galileo ha affermato e ha imposto la fede nell'impiego di mezzi ottici di osservazione, ma ha anche dimostrato che per meritare tale fiducia, i mezzi ottici dovevano possedere un grado di finezza fuori dell'ordinario; e infine il Keplero raggiunge una sintesi organica di tutti questi contributi, fino a dare una teoria geometrica delle lenti e del cannocchiale galileiano, e a prevedere un tipo nuovo di cannocchiale oculare convergente, quando ancora non era mai stato costruito.

Questo quadro si presenta organico e pacifico; ma un esame più accurato ne mette in evidenza dei contrasti, che meritano di essere chiariti. Non si può non riconoscere che non poche delle idee nuove del Maurolico si ritrovano enunciate e valorizzate nei *Paralipomena* del Keplero con una serie di ragionamenti che nessuno potrebbe considerare frutto del caso. Qualche esempio vale la pena di essere richiamato, a sostegno di questa conclusione.

Una delle novità più importanti è l'introduzione del « raggio » luminoso, come viene ancora utilizzato nell'ottica geometrica di oggi. L'impiego di raggi del genere porta alla demolizione del modello fondamentale dell'ottica antica, che era costituito dalle « specie » dette anche « scorze » o « simulacri »: perché una volta ragionando coi raggi, si arriverà a costruire le figure viste nei vari fenomeni ottici come raggruppamenti di vertici di coni di raggi e non più come entità complesse e permanenti, dotate di forme e di colori.

Ebbene, le primissime ipotesi (« Supposita ») del Maurolico, come è già stato riportato sopra, sono:

« 1ª Ogni punto di un corpo luminoso irradia in linea retta. 2ª I raggi più densi illuminano più intensamente; quelli ugualmente densi ugualmente ».

E il 1° Teorema che segue subito a queste ipotesi, chiarisce: « Ogni punto di un corpo luminoso irradia in ogni punto di un oggetto illuminato ».

Come già riferito nelle pagine precedenti, il Maurolico alla fine di questo brano pone la data: « Finito in Messina l'anno del Signore 1521, il 19 del mese di Ottobre ». Questa, dunque, si deve considerare la data di nascita del « raggio luminoso », geometrico, fino a prova contraria.

Ottantatré anni più tardi il Keplero espone le Proposizioni seguenti (riportate, anche nella lingua originale, nelle pagine precedenti):

I) « Alla luce compete la proprietà di effluire o di esser lanciata dalla sua sorgente verso un luogo lontano ».

II) « Da un punto qualunque l'efflusso della luce avviene secondo un numero infinito di rette ».

III) « La luce in se stessa è atta ad avanzare fino all'infinito ».

IV) « Le linee di queste emissioni sono rette, e si chiameranno raggi ».

La forma delle espressioni del Keplero non è identica a quella del discorso del Maurolico, ma non si può dire che il contenuto sia sostanzialmente diverso.

Un altro argomento riguarda la camera oscura: il Teorema XXII suona così: « Le figure di oggetti luminosi attraverso un foro si riportano capovolte sopra un piano ». L'abate Maurolico, applicando questo principio, riesce a spiegare le macchie tondeggianti di Sole sotto il fogliame degli alberi, problema che aveva sempre costituito prima di lui un mistero insondabile fin dai tempi di Aristotele. Nei *Paralipomena* il Keplero ripete sostanzialmente il ragionamento stesso. E ripete anche il contenuto del Teorema XXIII, del Maurolico, secondo il quale « una superficie, illuminata da una luce pura, emette una luce secondaria simile al suo colore ».

Più importante è la affinità dei ragionamenti dei due autori a proposito dello studio degli specchi concavi. Il Maurolico considera la riflessione di raggi partenti da una sorgente puntiforme, situata sia sull'asse, sia fuori dell'asse dello specchio. È noto che, dopo la riflessione sullo specchio stesso, essi possono costituire un fascio di raggi convergenti, ma non in un punto. Però il Maurolico nel Teorema XXXV, che è l'ultimo dei Teoremi dei *Photismi*, esprime un'idea, che è stata ripresa da Keplero, e che è divenuta un'idea fondamentale dei ragionamenti dell'ottica geometrica: l'enunciato del

Teorema è: « Dal concentramento dei raggi è possibile generare il fuoco ». Segue il discorso seguente: « Nello specchio cavo AB (figg. 1, 2 e 3) dal punto C del corpo solare incidano i raggi CD, CE, CF che concorrono quasi in un punto G. Infatti sebbene, come è risultato da ciò che si è detto sopra, i raggi giunti allo specchio da uno stesso punto non concorrano, dopo riflessi, in uno stesso punto, tuttavia manca poco a che i raggi riflessi da una piccola porzione dello specchio concavo si riuniscano in uno stesso punto... ».

Questa meravigliosa idea, a cui si deve se nell'ottica geometrica si è affermata la teoria delle immagini, sia di quelle dette oggi « reali », sia di quelle dette « virtuali » (che di fatto sono costituite proprio dal complesso dei vertici dei coni di raggi o riflessi dagli specchi, o emergenti dalle lenti, anche se non si tratta di veri vertici puntiformi) si trova enunciata nei *Photismi* del Maurolico proprio subito prima della data in cui fu scritta: « Finito in Messina l'anno del Signore 1521; il 19 del mese di Ottobre ».

Il Keplero ne ha afferrato subito la fecondità e l'importanza, e l'ha utilizzata nei suoi *Paralipomena*, mediante la traduzione in una forma concreta, cioè limitando l'estensione del sistema ottico usato, per mezzo di un piccolo diaframma.

Il confronto potrebbe ancora continuare, rilevando numerosi casi trattati anche nei *Diaphaneon*, ma si può giungere senz'altro alla conclusione: cioè si è portati a ritenere che il Keplero ha conosciuto le opere del Maurolico. E allora sorge la domanda: perché non lo ha citato, mentre cita a esuberanza il Porta, sopravalutandone a dismisura i meriti?

A questo punto vale la pena di riportare il giudizio contenuto in una lettera di Giovanfrancesco Sagredo all'amico Galileo a Firenze, in data 22 settembre 1612, a proposito dei *Paralipomena* del Keplero e del *De Refractione* del Porta: « Ho veduto il libro del Porta, gofissimo al possibile. Ho scorso il Paralipomenon ad Vitellionem del Keplero, huomo veramente dotto, ma tra' matematici a me pare che si possi chiamare peripatetico et enigmatico, siccome il Porta tra' dotti stimo che egli tenga il luogo che tengono le campane tra gli instrumenti di musica ».

Se un giudizio di questo tono era dato da un diplomatico che si interessava di scienza per passatempo, perché il Keplero, « huomo veramente dotto », anche se « peripatetico et enigmatico » e soprattutto competentissimo in ottica classica e moderna (a quel tempo) si prodiga in complimenti sperticati verso il Porta, fino a chiamarlo

« excellens naturae mysta » (che vorrebbe dire « eccellente sacerdote di culti segreti della natura »), mentre si sarebbe dovuto vergognare di averlo preso tanto sul serio? E ciò non in una lettera privata, o in un colloquio, ma nel pieno del Cap. V dei *Paralipomena* in cui viene spiegato il meccanismo della visione.

Si è portati a credere che il comportamento del Keplero abbia avuto uno scopo: forse di coprire qualche cosa che non era troppo regolare. Tanto più che il merito più evidente del Porta è stato quello di trattare le lenti distesamente nella *Magia Naturalis* del 1589, e di tentarne addirittura una teoria nell'VIII Capitolo *De Specillis* nel *De Refractione* del 1593. Il Keplero, che a proposito del meccanismo della visione mette bene in evidenza che ha preso dal Porta lo spunto e le premesse per dedicarsi alla soluzione di tale problema, nei *Paralipomena* (di 11 anni dopo) non cita per niente il primato del Porta in fatto di lenti, e non se ne interessa affatto, salvo un breve cenno, nella XXVIII Proposizione del V Capitolo, in cui però si fa premura di mettere bene in chiaro che invano ha cercato nelle librerie il contributo del Porta a proposito della correzione della presbiopia e della miopia (non conosceva bene le opere ottiche del Porta?) e ha trattato lo stesso l'argomento per soddisfare l'insistente pressione che per ben tre anni ha esercitato su di lui il principale dei suoi Mecenati, D. Ludovico L. B. Dietrichstein. E anche questo comportamento conferma quello che abbiamo già rilevato nelle pagine precedenti, che il Keplero nelle lenti ancora non ci credeva. Ma ancora, per lui il contributo del Porta, nonostante la sua qualità di « eccellente sacerdote dei culti segreti della natura », non è sufficiente a indurlo a studiarle.

A rendere ancora più intricata la matassa è avvenuto un fatto sorprendente: nel 1611, l'editore Tarquinio Longo di Napoli ha pubblicato un volumetto di 84 pagine, contenente i *Photismi* e il *Diaphaneon* dell'abate Francesco Maurolico. Non solo, ma nel 1613 ne esce una seconda edizione a Lione. L'edizione napoletana fu finanziata da un mecenate genovese, l'Airoli, e riproduceva un manoscritto originale del Maurolico, su cui erano state apportate delle note da parte del padre Cristoforo Clavio, il ben noto decano del Collegio Romano. L'editore però avverte che le note del padre Clavio sono state stampate in carattere corsivo, diverso da quello del testo principale.

Nella dedica al Mecenate è detto che la stampa era fatta ora (a 36 anni dalla scomparsa dell'autore, avvenuta nel 1575 a Messina) perché gli argomenti trattati avevano assunto un'importanza particolare dopo l'invenzione del cannocchiale, ed era desiderio dei nipoti dell'autore di salvare dal plagio quanto aveva scritto e che si trovava in giro in numerosi manoscritti, sia pure con qualche errore e senza le note del padre Clavio [47].

In base a queste notizie, si era portati a concludere che nel 1611 è uscita la prima edizione stampata del volumetto del Maurolico; che cioè sarebbe stata di sette anni successiva di quella del *Paralipomena* del Keplero. Certamente il Maurolico non può aver plagiato le idee esposte dal Keplero, perché nel 1604 egli era passato a miglior vita da 29 anni, ma poteva sempre sorgere il dubbio che il plagio ci fosse stato, per parte di qualcuno che l'avrebbe poi ornato del nome prestigiosissimo dello scienziato messinese. Per quanto questa operazione si presentasse straordinariamente improbabile, perché il padre Clavio, che ha curato ufficialmente l'edizione napoletana, e vi ha anche apportato delle note, messe in risalto dall'editore addirittura stampandole in carattere speciale, era una personalità superiore ad ogni sospetto, venerata e ammirata universalmente e nessuno avrebbe pensato che si sarebbe prestato a una operazione men che onesta; ma pur essendo anche noi della stessa opinione, ci siamo tuttavia interessati per cercare almeno una copia dei « numerosi manoscritti » che il Maurolico avrebbe distribuito nella cerchia dei suoi amici, e nel corso di queste ricerche ci sono pervenuti dei documenti, che complicano ancora più la situazione, perché potrebbero anche smentire ciò che è scritto nella dedica al Mecenate sopra ricordato.

Una prima notizia ci pervenne dalla Biblioteca dell'Accademia Nazionale dei Lincei di Roma: che i *Photismi* del Maurolico erano stati stampati a Venezia nel 1575 (l'anno della morte dell'autore) dalla tipografia di Francesco Franceschi. La fonte era molto autorevole, ma ci proponemmo di continuare le ricerche per trovare almeno un esemplare dell'opera stampata.

Ancora questa non è stata trovata; ma anche da altre fonti risulta che fu veramente stampata da quella tipografia. Presso il Museo di Storia della Scienza di Firenze, esiste nella Biblioteca un

[47] « ... Nam cum horum librarum manuscripta exemplaria in multorum manibus essent, quamquam mendis referta, et sine Clavii notis... ».

volume, stampato da quella tipografia, nel 1575 sul cui frontespizio è scritto:

D. Francisci MAUROLYCI Abbatis Messanensis, Opuscola Mathematica; nunc primum in lucem aedita, cum rerum omnium notatu dignarum. Indice Locupletissimo. Pagella huic proxime contigua, eorum Catalogus est. Cum Privilegio. Venetiis, Apud Franciscum Franciscium Senensem.

Un'altra copia identica è venuta alla luce presso la Biblioteca Nazionale di Firenze, nel Fondo Mediceo-Palatino.

Dal titolo riportato, pare che si trattasse di una specie di « Opera Omnia » del Maurolico, di cui quello esaminato sarebbe stato il primo volume; ma in entrambe le biblioteche suddette non è accompagnato da altri. E in questo i *Photismi* non ci sono. Ma ciascun esemplare si chiude con quattro pagine dedicate all'« Index Lucubrationum ». La prima comincia con un gruppo di argomenti trattati da Euclide, Menelao, Sereni, Archimede, Teone, Ruggero Bacone, Tolomeo, Autolico, Teodosio, Euclide (di nuovo) e Aristotele.

Nell'ultimo terzo della pagina stessa, sotto il titolo: *Propria ipsius Authoris* comincia una serie di titoli di scritti del Maurolico, serie che oltre a quel terzo di pagina riempie anche tutte le tre pagine seguenti. Il 14° e il 15° titolo a metà della seconda pagina sono:

Photismi de lumine et umbra, ad Perspectivam et radiorum incidentiam facientes.

Diaphana in 3. libros divisa. in quorum primo de perspicuis corporibus, In 2. de iride, in 3. autem de organi visuali structura, et conspicillorum formis agitur.

Proprio ciò che è contenuto nel volumetto edito a Napoli nel 1611. Ma vi è anche qualche cosa di più. La prima voce di questo indice è una specie di sommario: « Prologi, sive sermones quidam De divisione artium, De quantitate, De proportione, De mathematicae authoribus, De sphaera, De cosmographia, De conicis, De solidis regularibus, De operibus Archimedis, De quadratura circuli, De Instrumentis, De calculo, *De perspectiva*, De musica, De divinatione ». Si tratterebbe, dunque, di una raccolta di conferenze del Maurolico su tutti questi argomenti; ma ce ne interessa particolarmente uno: la « perspectiva », perché con questo a quel tempo non indicavano quella che oggi si chiama « prospettiva », ma quella che oggi si chiama « ottica ».

Non vi è dubbio, dunque, che nel 1575 presso la tipographia Franceschi di Venezia si trovava almeno uno dei manoscritti dei *Photismi* e dei *Diaphaneon* del Maurolico.

Dato però che non è stato trovato ancora nessun esemplare stampato da quella tipografia, a voler essere scrupolosi al massimo, si potrebbe dubitare che sia stato messo in programma (*Pagella huic proxime contigua* è scritto sul frontespizio del volume ora esaminato) ma che poi, morto l'autore, non sia stato realizzato tutto.

Ma altri documenti eliminerebbero questo dubbio. La Librairie Fumin Didot Frères ha pubblicato a Parigi, nel 1862, il *Manuel de Librairie et de l'Amateur des Livres*, nel cui vol. III in fondo alla colonna n° 1545, sta scritto:

MAUROLICUS (Franciscus). Photismi de lumine et umbra ad perspectivam et radiorum incidentiam facientes, et diaphanorum seu transparentium libri tres. *Neapoli per Tarquinius Longum*, 1611, in-4 (4269). *Cet ouvrage avait dejà paru à Vénise, en 1575, in -4*. L'édit. de 1611, sous la date de 1691, 24 fr. Libri.

Da questo documento (che si trova anche alla Biblioteca Nazionale di Firenze) non solo viene confermato che l'edizione dei *Photismi* a Venezia del 1575 fu fatta, ma ne risulta anche che era in -4, e che fu fatta una ristampa della edizione del 1611 nel 1691; della quale viene anche indicato il costo.

Un'altra conferma si trova in un'opera dal titolo: « Bibliotheca Sicula, sive De Scriptoribus Siculis, qui tum vetera, tum recentiora saecula illustrarunt. Auctore Sac. Theol. Doctore Antonino Mongitore ». Opera che si trova anche presso la Biblioteca dell'Accademia Nazionale dei Lincei di Roma. Nel 1° Volume, a pag. 226 comincia la voce che riguarda il Maurolico, estesa per ben sette colonne di formato in folio, nelle quali viene anche riportato l'elenco delle sue pubblicazioni per ben due colonne e mezzo. Fra queste si legge: « *Photismi de Lumine et Umbra ad prospectivam et radiorum incidentiam facientes*. Venetiis 1575. in -4, et Messanae apud Petrum Bream, 1613. in -4 ».

Dunque non solo viene confermato che nel 1575 fu stampata l'Edizione dei « Photismi » a Venezia, ma ne fu stampata anche una a Messina nel 1613 e anche di questa si dice che era -4, come quella di Venezia e se ne nomina l'editore.

Questo volume è stato pubblicato a Palermo nella tipografia di Didaco Bua, nel 1708.

Si è portati a concludere che i *Photismi* e i *Diaphaneon* del Maurolico a partire dal 1575 erano a disposizione del pubblico e che quindi se ne deve tener conto nel giudicare l'intervento degli scienziati del XVI e del XVII secolo ai quali si deve la catastrofe dell'ottica antica.

Quando è morto il Maurolico, il Porta aveva quarant'anni e il Keplero ne aveva quattro. La edizione della *Magia Naturalis* in cui il Porta parla per la prima volta e a lungo delle lenti positive e negative (e ne parla, perché le comprendeva in quelle magìe naturali di cui quell'opera era piena) uscì, come si è già ricordato, nel 1589, cioè quattordici anni dopo la morte del Maurolico. Il Porta non ne parla affatto, e ciò potrebbe significare che non ne conosceva l'opera, che pure era notissima in tutta l'Europa.

I *Paralipomena* escono nel 1604: il Maurolico era morto da 29 anni; il Porta ne aveva 69 e il Keplero 33. Si può dire che era ancora un giovane quasi alle prime armi, in condizione di trarre un buon vantaggio da un colpo magistrale. Se avesse conosciuto la produzione ottica del Maurolico, che fino al 1575 era rimasta clandestina, tranne i numerosi manoscritti con cui l'autore l'aveva comunicata a una cerchia di persone certamente molto ristretta, e vi si fosse dedicato con interesse, e da par suo, scoprendo di poterne trarre una serie di conseguenze meravigliose, un'ottica addirittura nuova, una teoria affascinante « de modo visionis », potrebbe anche darsi che pensasse di trarne il massimo vantaggio. Penetrato a fondo nella materia, e venuto a conoscenza sia della *Magia Naturalis*, sia del *De Refractione* del Porta, potrebbe anche aver architettato un piano ricco di risorse: tacere completamente ciò che riguardava il Maurolico, pur prendendone le idee nuove fondamentali, svilupparle magistralmente, attribuire grande valore alle sparate del Porta, notissime in tutto il mondo di allora, fino al punto di dichiararle base di partenza dei suoi studi e presentare questi al mondo scientifico come sua produzione.

L'enorme progresso delle sue conclusioni, in confronto delle miserie del Porta avrebbero convinto il pubblico dei lettori che il Keplero era un grand'uomo, fondatore di un'ottica nuova, in cui erano spiegati i principali misteri del meccanismo della visione.

Non si hanno prove dirette che questo sia stato il piano concepito e attuato dal giovane Keplero; ma crediamo che sia il solo che concordi con tutti i particolari della vicenda che, altrimenti, si presentano veramente molto strani.

Non escluso ciò che è avvenuto dopo la pubblicazione del volumetto napoletano, curato dal padre Clavio. Il Keplero non ha reagito affatto; e avrebbe avuto molte ragioni per reagire, perché in sostanza il libretto del Maurolico, non solo ha avuto l'edizione di Napoli del 1611, ma nel 1613 ne ha avuta una a Messina e una a Lione, ed ha avuto anche una ristampa nel 1691, come è dichiarato nel documento riportato poco sopra. Mentre dei *Paralipomena* non se ne è parlato più, dopo l'edizione del 1604.

L'essersi appropriato di idee nuove e straordinariamente feconde, come quelle del Maurolico, potrebbe anche trovare una giustificazione, tanto più valida, in quanto il Keplero era molto giovane. Il Maurolico era un personaggio molto in vista, ricco, potente e nelle alte sfere del mondo cattolico; il Keplero era giovane, povero e luterano; perciò può aver trovato anche ragionevole prender qualche cosa a un defunto, favorito dalla fortuna e di religione avversa. Ed è noto che non raramente la differenza di religione giustifica dei comportamenti che non si sarebbero mai tenuti fra correligionari.

Questa opinione deve essere stata molto diffusa nell'ambiente scientifico del XVII e anche del XVIII secolo, perché esplicitamente espressa in vari elogi scritti in onore del « celeberrimo Francesco Maurolico », dove si cita l'opera del Keplero come prosecuzione e sviluppo di quella dello scienziato messinese, senza però che qualche autore arrivi mai a considerare come un plagio l'uso che il Keplero aveva fatto delle idee nuove contenute nei *Photismi*. Forse a quel tempo operazioni del genere rientravano nella prassi ordinaria.

I *Paralipomena* del Keplero contengono molte idee nuove e molte osservazioni veramente importanti, utili anche oggi a chi si dedica allo studio dell'ottica, ma è strano che in buona parte siano state riesumate recentemente, dopo che erano state coperte di una spessa coltre di oblio. Un caso merita di essere messo in evidenza: quello delle immagini *viste* da un osservatore che guarda verso uno specchio piano; egli vede delle figure, dietro lo specchio, simmetriche degli oggetti che si trovano davanti alla superficie riflettente. Il Keplero si vanta di essere stato il primo a darne una « vera

demonstratio », dopo che matematici e filosofi di oltre due millenni avevano tentato invano di fare un discorso sensato che ne desse ragione.

Il Keplero afferma che l'immagine vista dietro lo specchio non vi si trova realmente, perché è una figura « intentionalis », cioè soggettiva, creata dall'osservatore in base agli stimoli ricevuti sulla retina dei suoi occhi, e in base a un calcolo che la psiche stessa dell'osservatore fa, o mediante la visione binoculare, o mediante la valutazione dell'apertura e delle direzioni dei lati del « triangulum distantiae mensorium », che ha per base il diametro della pupilla dell'occhio stimolato.

Oggi in tutti i testi di ottica, si ripete lo studio dei raggi riflessi dallo specchio e dei loro angoli; si determinano i vertici dei coni di raggi riflessi, verso gli occhi dell'osservatore, e si conclude, come se fosse evidentissimo, che l'immagine è formata da quei vertici, e perciò l'osservatore la vede *dove è*. È un discorso in gran parte falso, almeno troncato e incompleto, perché non si vuole ripetere la « vera demonstratio » data dal Keplero. Perché l'ottica di oggi non vuole parlare di immagini « intentionales ». È una questione di filosofia. L'ottica di oggi è positivista, e non vuol considerare niente di soggettivo. Anche se per ciò deve presentare come completi ed esaurienti dei discorsi troncati e inconcludenti.

Riprendendo in esame l'opera del Maurolico, se la confrontiamo con quella del Keplero, constatiamo che nella prima non si parla di immagini « intentionales » e non si danno elementi sul meccanismo col quale la psiche dell'osservatore ne costruisce gli elementi; perciò si spiega come è avvenuto che l'ambiente fisico e matematico del XVII secolo ha condannato all'oblio i *Paralipomena* e ha accolto con pieno favore i *Photismi*, che non solo sono stati diffusi in « numerosi manoscritti » dall'autore stesso, non solo sono stati pubblicati a Venezia nel 1575, non solo sono stati ripubblicati nel 1611 a Napoli, ma poi anche a Messina e a Lione, nel 1613, e ancora nel 1691.

Si deve riconoscere che la nuova ottica del secolo XVII è stata costruita sulla base delle idee esposte nei *Photismi* e nel *Diaphaneon*.

Il 1610 è stato l'anno della catastrofe dell'ottica antica. Anche i *Paralipomena*, al loro comparire, non furono compresi.

Chi ha modificato profondamente la situazione è stata la gran-

diosa polemica sui satelliti di Giove. Galileo solo da una parte col suo cannocchiale; dall'altra tutto il mondo accademico. Lotta di giganti, per la vita o la morte dei principi scientifici. Tutto il mondo si sveglia, assiste e partecipa alla lotta. La vittoria di Galileo cambia la mentalità e lo stato d'animo degli studiosi riguardo all'occhio e agli ordigni ottici; si comprende che la eccessiva diffidenza era frutto dell'ignoranza e che per secoli e secoli si era tenuto inoperoso un mezzo d'indagine potente e prezioso.

Con questo mutamento di direttive, l'ottica, prima lasciata alla cura di qualche sporadico cultore, passò al centro dell'attenzione dei filosofi e dei ricercatori: divenne un argomento d'attualità.

La « luce » ora aveva una consistenza assai più definita che in passato. Esisteva un « lumen » emesso dalle sorgenti luminose, che si propagava per raggi rettilinei emessi in tutte le direzioni da ciascun punto delle sorgenti stesse; veniva assorbito dai corpi opachi, veniva riflesso dai corpi lucidi, diffuso da quelli rugosi, trasmesso da quelli trasparenti; portava seco calore; quando era puro era bianco; ma per contaminazione con corpi colorati, ne traeva colore. Si propagava con velocità finita, ma grandissima secondo alcuni, addirittura infinita secondo altri. Questo « lumen », penetrando negli occhi, veniva concentrato sulla retina, e quivi impressionava il nervo ottico, dando origine alla visione.

Circa la natura di questo « lumen », alcuni lo consideravano puro moto, altri vi vedevano dei corpuscoli minutissimi lanciati a grande velocità lungo i raggi.

La questione presentava così aspetti geometrici, fisiologici e fisici.

Come abbiamo visto, *l'ottica geometrica* si era formata già fino dall'antichità; *l'ottica fisiologica* aveva preso sviluppo fino dalla metà del Medio Evo; ora a queste due scienze se ne doveva aggiungere una terza, *l'ottica fisica*, per studiare la natura e le proprietà del « lumen ».

Non è privo di interesse mettere in rilievo che la luce era nata nella visione e che non sarebbe stato possibile altrimenti. Se non ci fosse stata la vista, chi sa se neppure oggi si parlerebbe di luce. Orbene gli antichi filosofi avevano affrontato lo studio di questo senso e degli stimoli relativi, con criteri affini a quelli con cui avevano studiato gli altri sensi e avevano finito per dividersi in due correnti, che potremmo chiamare una oggettivistica e una soggettivistica: quasi come ripercussione della eterna lotta fra idealismo e materialismo.

Lo scontro fra le due correnti era avvenuto proprio nell'organo del senso della vista, cioè nell'occhio. Da questo doveva venire la prova cruciale in favore dell'una o dell'altra tesi.

Ecco perché bisognava risolvere il problema del meccanismo della visione.

Finché non si fosse trovata una soluzione ragionevole di questo meraviglioso fenomeno per cui si vedono le forme degli oggetti, non si sarebbe potuto trovare neppure quella di quell'altro fenomeno altrettanto meraviglioso, qual è il veder chiaro o scuro, e non si sarebbe mai potuto dar ragione o torto né a quelli che volevano infilzare nella pupilla le scorze degli oggetti, né a quegli altri che volevano mandare la loro anima a toccare gli oggetti, come con un bastone.

Il secolo XVII si apre a questo proposito con una chiarificazione definitiva. L'esistenza del « lumen » che già nel Medio Evo era divenuta molto probabile, è ora una cosa pacifica; ora anche le specie e le scorze sono demolite; al loro posto si trovano fasci di raggi, riuniti in coni ordinati.

Ancora esiste molta perplessità e molta confusione a proposito del « colore »; ancora i filosofi insistono sulle illusioni ottiche, sull'inganno della vista; ma l'affermarsi della filosofia naturale e dell'indagine sperimentale metterà in tacere questi « laudatores temporis acti » e spingerà i fisici pieni di fede e di entusiasmo alla ricerca della natura del « lumen » e allo studio delle sue proprietà.

DA CARTESIO A PADRE GRIMALDI

Se l'inizio del secolo XVII si mostrò così brillante con l'assestamento definitivo del meccanismo della visione, con l'affermazione del cannocchiale e la catastrofe dell'ottica antica, e con la teoria geometrica delle lenti, il seguito non fu da meno.

Nel campo dell'ottica geometrica lo Snellius [1] e il Cartesio [2] arrivarono a dare la formula esatta della rifrazione: il che costituì un'arma formidabile per lo studio dei fenomeni ottici dal punto di vista geometrico e portò un argomento di grande valore per il vaglio delle teorie sulla natura della luce. Finché la rifrazione era nota soltanto all'ingrosso, vi era maggior libertà e maggior incertezza sulla natura del « lumen »; ma ora che la legge completa è stata trovata, qualunque modello di « lumen » per esser accettabile, deve soddisfarla.

Il problema della natura del « lumen » costituiva lo scopo principale della nascente ottica fisica. Questa scienza nuova veniva ora a prendere un'importanza di primo piano non solo per la ragione particolare che in seguito alla definizione del meccanismo della visione l'esistenza del « lumen » era ritenuta ormai indiscutibile, ma anche per l'indirizzo generale degli studi scientifici che per il sopravvento preso dalla cosiddetta *filosofia naturale*, dava la massima importanza agli elementi fisici, a detrimento di quelli soggettivi.

Fu appunto in questo movimento filosofico che la « lux » andò perdendo ogni considerazione e addirittura col tempo finì con l'es-

[1] Willebrod Snell van Roijen nacque nel 1591 a Leyda e vi morì nel 1626.
[2] Descartes René Du Perron nacque nel 1596 a L'Aia e morì a Stoccolma nel 1650.

sere dimenticata, mentre il « lumen » divenne la sola « luce » di cui ci si doveva interessare.

Ancora dunque al principio del '600 si poneva la domanda: che cos'è la luce? Come venti secoli prima. Ma se formalmente la domanda era la stessa, ciò che si domandava era del tutto diverso. Un tempo si diceva: c'è il buio e c'è la luce; che cosa sono queste due cose che *noi vediamo*? Ora invece si dice: fuori di noi c'è un quid che si propaga in linea retta, che si riflette, si rifrange, che trae i colori dai corpi, porta seco calore, che forma immagini attaverso le lenti, che impressiona la rètina degli occhi. Questo quid, che noi chiamiamo luce, che cos'è?

Su questo tono l'argomento è stato affrontato nel secolo XVII.

Di esso si sono occupati tutti i filosofi del tempo, di qualunque scuola fossero. Oggi si suol ricordare Newton e Huyghens e si suol limitare a questi due grandi il merito di aver gettato le basi dell'ottica fisica. Ma è certamente un'impressione non corrispondente alla realtà; forse dovuta alla distanza di tempo, che, crescendo, tende ad esaltare i contrasti, a danno delle sfumature. La discussione sulla natura della luce era in pieno sviluppo ancor prima che essi fossero nati, e di essa si occupava tutto il mondo scientifico del tempo.

E anche per giudicare l'importanza del contributo che essi hanno arrecato, conviene prima esaminare quello degli altri.

Purtroppo non ci è stato possibile estendere l'indagine, come sarebbe stato utile e desiderabile da parte nostra, a tutta la letteratura dell'epoca, per ricostruire le discussioni e i contributi dei singoli collaboratori; tuttavia crediamo di aver concentrato la critica sulle opere di importanza più vasta.

Abbiamo citato il nome di Cartesio. Egli ebbe meritatamente grande fama e stima anche da parte dei contemporanei; e anche per i suoi studi di ottica. Lo studio della formula della rifrazione, di alcune forme di lenti asferiche e dell'arcobaleno dimostrano la perizia del filosofo nelle questioni di ottica geometrica, anche se vi erano stati dei precursori e dei predecessori, come Snellius per la prima e Antonio De Dominis per l'ultimo [3].

[3] Antonio De Dominis, arcivescovo di Spalato, nacque ad Arbe nel 1566 e morì a Roma nel 1624. Il suo trattato *De radiis visus et lucis in perspectivis et iride* è del 1611.

Però non si direbbe che si sia occupato a fondo della natura della luce. Nella *Dioptrique*, che risale al 1638, tratta l'argomento, ma premette che per il suo scopo, che in fondo è di studiare la visione e i cannocchiali, non vi era bisogno di dire veramente che cosa essa fosse, e riteneva sufficiente servirsi di due o tre analogie; alle quali peraltro annette una potenza considerevole, perché le ritiene atte a spiegare *tutte* le proprietà della luce che l'esperienza aveva rivelato, e per dedurne poi *tutte* le altre, che non si possono rivelare tanto facilmente [4].

Il primo paragone è quello di... venti secoli addietro: l'uomo al buio che, munito di un bastone, può rendersi conto degli oggetti circostanti, tastandoli con questo; e subito Cartesio ne deduce per analogia « che la luce non è altro, nel corpo che si chiama luminoso, che un certo moto o una certa azione molto pronta e molto vivace che passa verso i nostri occhi attraverso l'aria e gli altri corpi trasparenti nello stesso modo che il movimento o la resistenza dei corpi incontrati da questo cieco passa verso la sua mano, attraverso il bastone » [5].

Il discorso sa molto di... greco. Tuttavia nel seguito appare un concetto che, per l'epoca, era d'avanguardia: il vedere i colori è un'operazione affine a quella con cui un cieco con un bastone sente gli alberi, le pietre, l'acqua, etc.; cioè essi colori non sono altro che le diverse maniere di muoversi o di resistere sotto i movimenti del bastone.

Cartesio comincia così (se altri meno noti non l'hanno fatto prima di lui) l'attacco contro l'ultima forma di « species intentionales », cioè contro quella specie di residuo delle « scorze » di buona memoria, con cui i filosofi continuavano a spiegare la natura dei colori. Come abbiamo già detto, la luce, al principio del 1600 era *incolore*. Una cosa era la luce, altra cosa erano i colori. Come risulta anche dai brani della *Margarita philosophica* riportati nel Cap. precedente (pp. 68 sgg.), e come risulterà meglio da ciò che ne diremo in questo Cap., la « filosofia », salvo qualche residuo

[4] « ..., il n'est pas besoin que j'entreprenne de dire au vrai quelle est sa nature, et je crois qu'il suffira que je me serve de deux ou trois comparaisons qui aident à la concevoir en la façon qui me semble la plus commode pour expliquer *toutes* celles de ses propriétés que l'expérience nous fait connaître, et pour déduire ensuite *toutes* les autres qui ne peuvent pas si aisément être remarquées » (*La Dioptrique, Discours premier*, Oeuvres de Descartes, publiées par Victor Cousin, Levrault, Paris 1824, vol. V, p. 5).

[5] Ivi, p. 6.

trascurabile, aveva ormai mollato *la luce* ai fisici, ma si teneva ancora i colori, pretendendo che dai corpi colorati e per taluni anche da quelli bianchi e da quelli neri, uscisse questa emanazione, guidata dai raggi luminosi, fino a entrare nell'occhio, per produrvi lo stimolo.

Cartesio si dichiara contrario a questa teoria, e così, con gli argomenti che abbiamo riportato, conclude, che, come niente degli oggetti toccati sale lungo il bastone del cieco fino alle sue mani, lo stesso deve succedere per la luce; « ... e, così, il vostro spirito sarà liberato da tutte quelle piccole immagini, volteggianti nell'aria, chiamate *specie intenzionali*, che affaticano tanto l'immaginazione dei filosofi » [6].

Mentre da queste dichiarazioni si sarebbe portati a vedere in Cartesio un seguace della scuola pitagorica, poche righe dopo questa dichiarazione così recisa e... futurista, tira in ballo delle idee addirittura platoniche:

gli oggetti della vista possono essere sentiti non soltanto per mezzo dell'azione che, essendo in essi, tende verso gli occhi, ma anche per mezzo di quella che, essendo negli occhi, tende verso essi. Tuttavia, poiché quest'azione non è altro che la luce, bisogna notare che si trova soltanto negli occhi di coloro che possono vedere nelle tenebre della notte, come i gatti; e che gli uomini *ordinari* non vedono che per l'azione che viene dagli oggetti...

Evidentemente le idee non sono tanto chiare: la luce è un movimento? È un'azione? È modificata dagli oggetti illuminati e quindi, arrivando modificata agli occhi, fa vedere i colori? E allora che cosa c'è negli occhi dei gatti e anche in quelli degli uomini non *ordinari*, che ci vedono nelle tenebre della notte?

A questo punto Cartesio sente che il suo modello o analogia n. 1 non è più sufficiente e passa al secondo. Un tino pieno d'uva, con due fori nel fondo. Non esistendo vuoto in natura ed esistendo corpi porosi, « una materia sottilissima e fluidissima » li deve riempire: come il mosto che riempie lo spazio fra i vari acini d'uva nel tino; questi rappresentano la materia grossa. L'uscita dai fori del fondo non è impedita dalla presenza dei graspi. « Così tutte le parti della materia sottile toccate dalla superficie del Sole che è

[6] Ivi, p. 8.

rivolta verso di noi, tendono in linea retta verso i nostri occhi, nel medesimo istante (per Cartesio la velocità della luce è infinita) in cui vengono aperti », senza che le varie correnti si disturbino a vicenda e senza che siano disturbate dalla materia o dal vento che agita l'aria.

Si direbbe che qui l'autore avesse in animo di dare alla luce una struttura materiale, sia pure ricorrendo alla materia « sottile », che riempie i pori della materia vera. A rigor di termini la materia vera dovrebbe ora acquistare un'attitudine negativa, d'impaccio o di ritardo, per quanto l'esempio del tino avesse per scopo di dimostrare che il mosto esce dai fori del fondo anche se ci sono gli acini nel mezzo; ma nessuno, autore compreso, dubita che se anche il fluido passa in presenza degli ostacoli, passerebbe meglio se gli ostacoli non ci fossero. Però non si vede bene come si accordi questo concetto con quello che lo stesso autore ha detto sopra, quando ha paragonato la funzione dell'aria e dei corpi trasparenti a quella del bastone, quando cioè li ha considerati come tramiti di quella *azione* che deve giungere ai sensi.

Cartesio di questo non se ne preoccupa, e utilizza il modello n. 2 per rendere l'idea della trasparenza e della propagazione della luce nella materia. Ma ci si intrattiene poco, perché passa al modello n. 3: un proiettile materiale lanciato e la sua traiettoria sono paragonabili a un raggio luminoso. Con questo spiega la riflessione e la diffusione sulle superfici rugose. Naturalmente prende ad esempio dei getti di sabbia formati da innumerevoli elementi, per rappresentare un fascio luminoso.

Come questo modello si concili coi precedenti, Cartesio non si preoccupa di spiegarlo. Si dimentica, provvisoriamente, di quelli e va avanti con questo. Una volta i colori erano dovuti al modo col quale i corpi modificavano la luce? Ora continua in quest'idea: anche se la luce, che prima « non era altro che un'azione », ora è divenuta un proiettile. La soluzione indubbiamente è ingegnosa: « Bisogna notare che la palla, oltre al suo movimento semplice e ordinario, che la porta da un luogo all'altro, ne può avere un secondo, che la fa girare intorno al proprio centro, e che la velocità di questo può avere vari e numerosi rapporti con quella dell'altro ».

Nella riflessione sui corpi speculari questo movimento di rotazione rimane invariato; in altre circostanze può cambiare e allora... cambia il colore della luce. E porta l'esempio di chi giuoca « à la

paume »[7]. Però, discutendo dei vari colori in base a questo modello, aggiunge: « perché io penso di poter determinare in che cosa consiste la natura di ciascuno di questi colori, e di farlo vedere

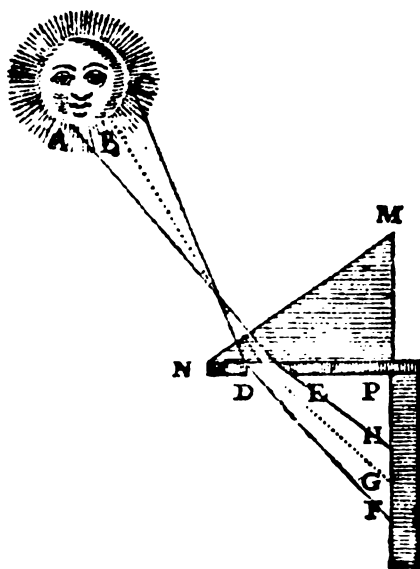



Fig. 13 Dispositivo per mostrare la rifrazione e la formazione dei colori con un prisma (dalle *Meteore* di Cartesio).

per mezzo dell'esperienza; ma ciò oltrepassa i limiti del mio argomento ».

Che peccato!

Passando al « Secondo Discorso », quello sulla « Rifrazione », sempre nella *Dioptrique*, Cartesio vi studia la riflessione, la diffusione e la rifrazione, *non della luce, ma dei proiettili*; trova la legge della rifrazione e della riflessione totale; e la dimostra sperimentalmente così: « Cosa che qualche volta è stata sperimentata con disappunto, quando facendo sparare dei pezzi di artiglieria,

[7] « ... ce que ceux qui jouent à la paume éprouvent assez lorsque leur balle rencontre des faux carreaux, ou bien que la touchent en biaisant de leur raquette, ce qu'ils nomment, ce me semble, couper ou friser », ivi, p. 14.

per giuoco, verso il fondo di un fiume, sono stati feriti coloro che erano dall'altra parte sulla riva ».

Stabilite le leggi per i proiettili, naturalmente senza tener conto della gravità, le estende alla luce, con appena qualche variante formale: « Enfin, d'autant que l'action de la lumière suit *en ceci* les mêmes lois que le mouvement de cette balle,... » si possono estendere alla luce le conclusioni meccaniche.

Naturalmente questa affermazione è puramente gratuita, e soltanto è appoggiata ad una presunta conferma sperimentale. Perché dopo tutto Cartesio dimostra la legge della rifrazione col ragionamento dell'Alhazen: scompone i moti normalmente e parallelamente alla superficie rifrangente, mantiene inalterata la componente parallela e varia l'altra in conseguenza della resistenza del mezzo. Vi aggiunge la *forma matematica* nuova, che il rapporto dei seni degli angoli di incidenza e di rifrazione è costante. Se non che le cose vanno a rovescio: il fatto che la luce passando dall'aria all'acqua si avvicina alla normale alla superficie di separazione porta alla conclusione che la componente normale del moto è aumentata! « Mais peut-être vous étonnerez-vous, en faisant l'expérience... » dice lo stesso Cartesio. E come spiega questo paradosso, che la velocità della luce debba esser maggiore nel mezzo più denso?

Cosa che voi non troverete più strana tuttavia, se vi ricorderete la natura che io ho attribuito alla luce, quando ho detto che essa non era altro che un certo movimento o un'azione ricevuta in una materia sottilissima che riempie i pori degli altri corpi;...

e riprendendo ancora il paragone balistico, aggiunge:

come una palla perde più del suo moto urtando contro un corpo molle che contro uno duro, e che essa ruzzola meno facilmente sopra un tappeto che sopra una tavola tutta nuda, così l'azione di questa materia sottile può essere impedita più dalle parti dell'aria, che, essendo come molli e sconnesse, non le oppongono molta resistenza, che non da quelle dell'acqua che gliene oppongono di più; e ancor più da quelle dell'acqua che da quelle del vetro o del cristallo... [8].

Veramente c'è da domandarsi che cosa Cartesio intendesse per luce: moto? Materia? Oggettiva? Soggettiva?

[8] Ivi, p. 27.

Si ha l'impressione che egli adoperi un modello o l'altro, come ipotesi di lavoro, per rappresentare, più che spiegare le proprietà della luce. Però non si capisce la conclusione alla fine del « Secondo Discorso »: « perché infine io oso dire che i tre modelli, di cui mi sono servito, sono così adatti che tutte le particolarità che vi si possono notare corrispondono a delle altre che si trovano del tutto simili nella luce; ma io non mi sono occupato che di spiegare quelle che si riferivano di più al mio argomento... »[9].

Meno male che dichiara che *osa* dir questo; manifesta certo una buona dose di coraggio.

Come curiosità storica, è notevole una profezia: un'idea che precede di quasi tre secoli un parto della modernissima teoria della relatività. Sempre nel « Secondo Discorso » della *Dioptrique* c'è il passo seguente: « Tuttavia si possono trovare altri corpi, principalmente nel cielo, dove le rifrazioni, essendo dovute ad altre cause, non sono così reciproche. *E si possono anche dare certi casi nei quali i raggi si debbono curvare ancorché attraversino un unico corpo trasparente, così come si curva spesso il moto di una palla, perché essa è deviata da una parte dal suo peso e da un'altra parte dalla spinta ricevuta, o per altre ragioni diverse...* ». Nessuno forse avrà pensato che fra coloro che seguivano con ansia le esperienze intese a dimostrare la flessione dei raggi delle stelle fisse attorno alla massa del Sole, vi poteva essere anche l'ombra di Cartesio!

Ma lasciamo le profezie. La luce esce dalle mani di Cartesio molto confusa e amorfa, ma ancora con dei progressi definiti. La formula della legge della rifrazione, così indovinata e fedele, doveva costituire un'arma formidabile per l'ulteriore sviluppo dell'ottica geometrica e dell'indagine sperimentale, ossia per le sorgenti delle cognizioni che dovevano definire il concetto della luce.

La battaglia per liberare il colore dalle grinfie dei filosofi del vecchio stampo era ingaggiata; il dilemma sulla natura della luce, materiale o cinetica, si stava delineando. Idee nascenti, abbozzate; ma progresso. E questa è la via della scienza.

[9] « ...; car, enfin, j'ose dire que les trois comparaisons dont je viens de me servir sont si propres, que toutes les particularités qui s'y peuvent remarquer se rapportent à quelques autres qui se trouvent toutes semblables en la lumière; mais je n'ai tâché que d'expliquer celles qui fasoient le plus à mon sujet... », ivi, p. 29.

Le idee di Descartes suscitarono delle reazioni molto interessanti. Fra le altre merita menzione particolare la polemica con Pierre Fermat [10], che in quell'occasione arrivò a enunciare il principio che tuttora porta il suo nome.

Il principio di Fermat è oggi uno dei pilastri su cui si basa la teoria della radiazione. Le sue origini sono molto remote: come abbiamo già riferito nel Cap. primo, che « la vista debbe andare quanto più presto sia possibile alla cosa da vedersi » è già espresso nella *Prospettiva* di Eliodoro da Larissa, che a sua volta prende l'idea da Erone:

Essendo che ha dimostrato il Mecanico Herone, nel libro degli specchi, che quelle rettilinee, che ad angoli uguali si rompono, sono minori di tutte le altre, che dalle medesime simili parti vengono, e si rompono alle parti medesime ad angoli ineguali. Il che havendo dimostrato disse: Se la natura non ha indarno operato intorno al veder nostro, il rompimento del vedere si fa con angoli pari. Et questo si vede chiaro, poiché i raggi del Sole si rompono ad angoli pari...

Come abbiamo rilevato nel Cap. primo, è stata un po' troppo affrettata l'estensione alla rifrazione del concetto di minimo percorso, che per la riflessione era stato dimostrato ed espresso così correttamente e giustamente. La ragione per cui al tempo di Erone e di Eliodoro non era possibile dimostrare la validità del concetto di minimo percorso nella rifrazione è che allora non si aveva la minima idea della velocità della luce. Per questo dunque l'idea di Erone per tanti secoli rimase allo stato embrionale, e non ebbe seguito. Nel secolo XVII essa ebbe una ripresa molto interessante. Come si svolsero le cose ce lo racconta una lunga lettera di Pierre Fermat a un personaggio innominato, lettera che è a pag. 156 del volume *Varia opera mathematica D. Petri De Fermat* pubblicato a Tolosa nel 1679, quattordici anni dopo la morte dell'autore, a cura del figlio Samuele.

In questa lettera il Fermat scrive come fu che dette la dimostrazione del suo principio. L'esposizione è così chiara e ordinata che piuttosto di raccontare la storia con altre parole crediamo meglio tradurre senz'altro il testo della lettera:

[10] Pierre Fermat nacque a Beaumont-de-Lomagne, presso Tolosa, nel 1608 e morì a Castres nel 1665.

« Signore,

« Poiché il Sign. de xxxx parla, e voi l'ordinate, voi, Signore, che avete sì grande riputazione e così bene affermata, lascio svegliare la mia Geometria, che dormiva da lungo tempo in un profondo riposo, e per entrare subito in argomento, voglio appunto raccontarvi l'intrigo de la nostra *Dioptrique* e delle nostre rifrazioni, in forma di Storia, al fine di lasciarvi il giudizio libero, perché possiate pronunciarvi senza preoccupazioni. Dopo che ho visto il libro del fu Signor Descartes, e che ho esaminato con qualche attenzione la proposizione che serve di fondamento alla sua *Dioptrique* e che stabilisce la proporzione delle rifrazioni, sono divenuto sospettoso circa la sua prova, la sua dimostrazione mi è sembrata un vero paralogismo. 1°, perché egli la fonda sopra un paragone e voi sapete che la Geometria non dà gran peso a questo sistema, i confronti essendovi ancora più odiosi che nelle relazioni ordinarie. 2°, perché egli suppone che il movimento della luce nell'aria e nei corpi rarefatti è più difficoltoso, o, se voi lo preferite, più lento che quello nell'acqua e negli altri corpi densi, ciò che mi sembra urtare il senso comune; e infine perché egli pretende che una delle direzioni o delle determinazioni del movimento di una palla sussista tutta intera dopo aver incontrato il secondo mezzo; aggiungevo anche qualche altra ragione, che sarebbe superfluo o noioso riferirvi; egli vide i miei scritti, rispose loro e dopo numerose risposte e repliche da una parte e dall'altra ci separammo come il prevenuto e il testimone, l'uno nell'affermativa, l'altro nella negativa, per quanto io avessi ricevuto infine delle lettere da parte sua piene di gentilezze.

« Dopo la sua morte, il Signor De la Chambre avendo pubblicato il suo trattato sulla luce e avendomi fatto l'onore di inviarmelo, io presi l'occasione per scrivergli la lettera che voi avete visto, nella quale io gli indicavo che per garantirci dai paralogismi in una materia così oscura io non vedevo via più sicura che di cercare le rifrazioni in questo unico principio, che la natura agisce sempre per le vie più brevi, in base al quale io gli suggerivo che si poteva cercare per via geometrica il punto di rifrazione, riducendolo al problema o teorema che voi sapete; ma poiché io ne ritenevo la ricerca molto difficile e molto complicata, poiché queste questioni di massimi e minimi conducono generalmente a delle operazioni di lungo sviluppo, e che si imbrogliano facilmente per una infinità di asimmetrie che si incontrano sul loro cammino, io

arrestai a tal punto il mio lavoro, per parecchi anni in attesa che qualche Geometra meno pigro di me ne facesse o la scoperta o la dimostrazione. Nessuno volle intraprendere questo lavoro; mentre io ricevevo lettere dal Sign. De la Chambre, di quando in quando, con le quali insisteva perché aggiungessi la Geometria al mio principio e facessi la dimostrazione in forma di vera base delle rifrazioni. Ciò che mi tratteneva inoltre era l'assicurazione da parte del Sign. Petit e di altri, che le loro esperienze, fatte ripetutamente per misurare le rifrazioni e nell'acqua e nel cristallo e nel vetro e in molti altri liquidi differenti erano in preciso accordo con la proposizione del Sign. Descartes, di modo che mi sembrava inutile d'andarne a cercare qualche altra per la via del mio principio, dal momento che la natura stessa si pronunziava così decisamente in suo favore. L'obbiezione che voi mi fate nel vostro scritto non mi dava nessuna preoccupazione, e io avevo digià risposto nella mia lettera al Sign. De la Chambre per questa ragione, che tutto ciò che si appoggia o si arresta su qualche punto di una linea curva è come se si arrestasse o si appoggiasse sulla retta tangente alla

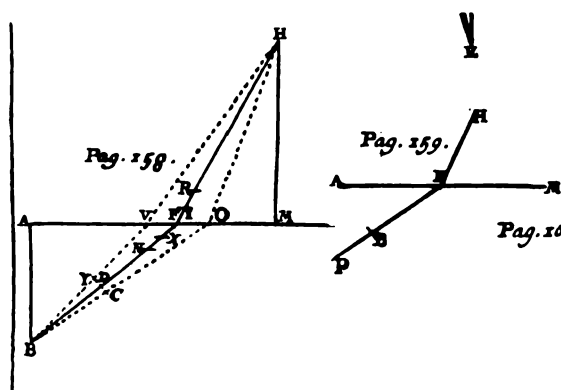



Fig. 14 Schema su cui Fermat fece la dimostrazione che dal suo principio deduceva la formula della rifrazione.

curva in tal punto, e così benché la somma di due linee di riflessione sia talvolta la più grande negli specchi concavi, sferici o di altra forma, essa è sempre la più piccola di tutte quelle che possono cadere sulla linea o sul piano che toccano gli specchi nel punto

di riflessione, e ciò non ha bisogno di ulteriori dimostrazioni, dato che anche il Sign. Descartes lo ammette come me; tutta la difficoltà si riduceva dunque al fatto che mi pareva che io dovessi combattere non solo gli uomini, ma anche la natura. Tuttavia le ultime insistenze del Sign. De la Chambre furono così energiche che mi risolsi, due o tre anni fa circa, di tentare la via della mia analisi, immaginandomi che ci fossero un'infinità di proposizioni diverse tra loro, di cui i sensi non avrebbero saputo verificare la diversità, e che così forse io ne avrei trovato qualcun'altra che sarebbe stata molto vicina a quella del Sign. Descartes, pur non essendo la medesima. Feci la mia analisi con un metodo che mi è particolare e che Herigone tempo fa ha fatto stampare nel suo corso di Matematica, superai tutte le asimmetrie con fatica, ed ecco che alla fine a un tratto tutto si schiarisce e mi viene un'equazione molto semplice che mi dà proprio la stessa formula del Sign. Descartes; sul momento credetti di aver preso un equivoco, perché non potevo pensare che si giungesse alla stessa conclusione per vie del tutto opposte; dato che il Sign. Descartes supponeva per uno dei mezzi della sua dimostrazione che il movimento della luce trova più resistenza nell'aria che nell'acqua, e io supponevo proprio il contrario, come vedrete nella copia della dimostrazione che ho cercato di rifare a memoria per darvi piena soddisfazione, il mio originale essendo stato inviato al Sign. De la Chambre secondo la mia consueta pigrizia. Rifeci dunque a più riprese i calcoli, cambiando i dati di partenza, e trovavo sempre le stesse conclusioni: il che mi confermò due cose: una che l'opinione del Sign. Descartes sulla legge della rifrazione era giustissima, l'altra che la dimostrazione era molto falsa e piena di paralogismi. I signori Cartesiani videro in seguito la mia dimostrazione che fu loro data dal Sign. De la Chambre e dapprima furono dell'opinione di respingerla. e per quanto io gli facessi presente molto gentilmente che a loro doveva bastare che il campo di battaglia restasse al Sign. Descartes, poiché la sua opinione risultava vera e confermata, sia pure per delle ragioni diverse dalle sue, che i più famosi conquistatori non si stimavano meno felici quando la vittoria era loro procurata da truppe ausiliarie, che quando ciò avveniva con le proprie, essi non vollero affatto intendere ragione nei primi moti, volevano che la mia dimostrazione fosse falsa, poiché essa non poteva sussistere senza distruggere quella del Sign. Descartes che essi intendevano di metter sempre fuori gara; ma poiché i più abili geometri che

videro la mia sembrava che l'approvassero, essi infine mi fecero un complimento con una lettera del Sign. Clairsellier, che è quello che ha procurato la stampa delle lettere del Sign. Descartes, gridarono al miracolo perché una stessa verità si era incontrata all'apice di due percorsi del tutto opposti e decisero di voler ben lasciare la cosa indecisa e di riconoscere che essi non sapevano a chi, se al Sign. Descartes o a me, dare la preferenza a questo proposito, e che i posteri avrebbero dato il loro giudizio. Spetta a voi, Signore, che siete destinato per il vostro merito straordinario, ad avere grandi relazioni con i posteri stessi a informarli, se lo ritenete del caso, di questa celebre diatriba, o, se preferite porre questo piccolo scritto fra le voste carte inutili, ne sono consenziente e tutto mi è indifferente; ma non è lo stesso della umilissima preghiera che vi faccio di credermi etc... ».

Alla lettera segue un allegato con la dimostrazione che il percorso secondo cui avviene la rifrazione secondo la nota legge della rifrazione è quello che richiede il *minimo tempo* alla luce per andare da un punto del primo mezzo a un dato punto del secondo.

Naturalmente una dimostrazione di minimo che oggi qualunque studente di analisi infinitesimale farebbe in un momento, richiedette tre secoli fa l'abilità d'un Fermat per essere portata in fondo, per una via assai contorta e lunga. Ma ciò ha interesse per la storia della matematica, non per la nostra. Noi dovremmo invece rilevare, non per mettere in evidenza i punti deboli del ragionamento del Fermat, ma per porre le premesse degli sviluppi successivi della vicenda, che se il ragionamento matematico era inattaccabile, anche se lungo e contorto, non altrettanto si poteva dire degli elementi fisici su cui era basato; perché i postulati di partenza, che hanno servito ad impostare le equazioni, non sono espressi nitidamente e inequivocabilmente, ma sono lasciati sotto forma intuitiva. Si parla di « resistenza » all'avanzamento della luce nei vari mezzi, si parla di tempo impiegato a percorrere certi tragitti, e si postula tacitamente che i due siano collegati da una proporzionalità semplice, cosicché mentre in certe frasi si fa appello ad una tendenza della natura ad « agire per le vie più brevi » [11], in sostanza la dimostrazione conclude che la traiettoria della luce per andare da

[11] Le parole del testo sono proprio queste: « Il suit de la qu'en posant mon principe, que la nature agit toûjours par les voyes les plus courtes... » (Pierre Fermat, *Varia opera mathematica*, Tolosa 1679, p. 160). Lo stesso enunciato del principio si trova anche a p. 115, nel corso della lettera sopra tradotta.

un punto *B* nell'aria ad un punto H nell'acqua è quella per cui essa impiega il tempo minimo. Ciò è dimostrato appunto postulando che nel tragitto aereo la velocità di propagazione della luce sia maggiore di quella nell'acqua, e precisamente che le due velocità stiano nello stesso rapporto dei seni degli angoli di incidenza e di rifrazione.

È anche interessante rilevare che alla fine della dimostrazione allegata alla lettera, il Fermat non esita a dichiarare che la teoria del Descartes deve esser « falsa » perché la dimostrazione stessa valeva soltanto quando la velocità della luce fosse stata maggiore nell'aria che non nell'acqua. Questo rilievo ci permette di valutare la fine diplomazia della proposta fatta ai cartesiani di contentarsi del fatto che la legge della rifrazione infine usciva salva dalla polemica e che quindi essi restavano padroni del campo. I cartesiani hanno capito però che la vittoria era molto apparente e pochissimo reale, e finché hanno potuto hanno respinto la « generosa » offerta. Quando l'hanno dovuta ingoiare, hanno cercato di farlo... il meno possibile, e hanno lasciato ai posteri l'ardua sentenza.

Comodo questo sistema. Tenendo presente che questa lettera è più anziana di una quarantina d'anni dell'*Ottica* di Newton, si può anche pensare che quest'ultimo abbia apprezzato la comodità del sistema e l'abbia poi utilizzato al momento opportuno.

Questa lettera del Fermat è senza indirizzo e senza data: ma gli anni in cui può essere stata scritta sono molto pochi. Infatti il libro del De la Chambre, a cui si fa allusione è stato stampato nel 1662 a Parigi (Editore Jacques d'Allin); d'altra parte il povero Fermat morì, appena cinquantasettenne, nel 1665. Tenuto conto del fatto che egli dice nella lettera di aver fatto la sua dimostrazione « due o tre anni fa circa », e che dopo la dimostrazione stessa vi è stata la lunga discussione coi cartesiani, si deve concludere che il Fermat deve avere scritto queste righe poco prima di morire, alla fine del 1664 o al principio del 1665, e probabilmente la lettera non deve esser partita e deve essere stata trovata nelle sue carte dopo la sua morte.

Suffraga questa tesi la circostanza che vi è allegato il foglio con la dimostrazione, che doveva essere l'originale da spedire e non una minuta, dato che l'autore anche quando aveva inviato la primissima dimostrazione al De la Chambre, non ne aveva fatto, « per la sua consueta pigrizia », nemmeno una copia.

Quindi il potente personaggio a cui il Fermat aveva in animo

di lasciare il compito di informare i posteri della « celebre demélé » (e anche questo gesto ci fa vedere il povero Fermat conscio della sua prossima fine) non ha ricevuto l'incarico testamentario o non l'ha potuto esplicare.

« Substantia aut accidens »? Ancora, dopo almeno tre secoli di discussioni al livello più alto, torna sul tappeto il problema che era stato impostato, proprio in questa forma, dai *perspectivi* del XIII secolo. Si trova di nuovo in un volume interessantissimo, di mole considerevole, quale la *Physico-mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* del Padre Francesco Maria Grimaldi, bolognese; volume stampato a Bologna nel 1665 [12].

L'opera consta di un Proemio e di due Libri. Basta leggere il primo e le testate degli altri due per avere subito una visione sintetica del contenuto.

Libro primo. Costituito da sessanta proposizioni, da cui, con certi nuovi esperimenti, si deduce ciò che sembra esser favorevole all'opinione di alcuni circa la sostanzialità del lume. Però ciò sarà demolito nel Libro 2°, e in questa occasione si trattano molte questioni relative ai colori apparenti e permanenti, e se ne dimostrano anche molte a proposito dell'Arcobaleno.

Libro secondo. Costituito da sei proposizioni, in cui si dimostra come e per quali ragioni si possa sostenere l'opinione peripatetica dell'accidentalità del lume. E tuttavia da tutto questo non consegue che i colori permanenti siano qualche cosa di effettivamente distinto dal lume, come si crede volgarmente [13].

Non si può non restar sorpresi di fronte ad un autore che scrive 472 pagine per sostenere una tesi contro un'altra; e poi ne scrive altre 60 per concludere che tutto sommato e salvo una questione

[12] Padre Grimaldi nacque a Bologna nel 1618 e vi morì nel 1663.

[13] « Liber primus. Sexaginta propositiones continens Quibus ex novis quibusdam Experimentis deducuntur ea, quae videntur favere Opinioni aliquorum *De Substantialitate Luminis*. Dissolvenda tamen in 2° Libro, Eaque occasione multa traduntur de Coloribus Apparentibus, ac Permanentibus, et multa etiam demonstrantur de Iride ».

« Liber secundus. Sex propositiones continens, In quibus statuitur An, et qua ratione sustineri possit Opinio Peripatetica *De Luminis Accidentalitate*, Et ex hac tamen non sequi colores Permanentes esse aliquid reipsa distinctum a Lumine, et in corporibus, ut vulgo putatur, residens ».

laterale, poteva esser giusta anche la tesi contraria. Conversione? No, perché una conversione avrebbe potuto esserci se il secondo libro fosse uscito separato dal primo e in un tempo successivo. Invece l'opera è unica; è l'opera di uno che ha passato tutta la vita, disgraziatamente breve, a studiare l'argomento, e alla fine, decisosi a riassumere i risultati, si trova a dover dichiarare che fra le due ipotesi possibili egli è propenso per una, ma non può escludere l'altra assolutamente.

Non conversione, ma perplessità. E ciò risulta anche dal Proemio. L'autore lo comincia mettendo le mani avanti: che la luce ci sia lo sanno tutti coloro che non sono ciechi, ma la sua natura e la sua consistenza, « naturam et quiditatem », è un gran mistero [14]. Egli non promette mari e monti, ma se la piglia con la maggior parte dei filosofi che con grandi discorsi e con « aenigmatica verborum mysteria », non fanno che confondere le idee, mentre dicono che le rendono chiare. Allusione evidente alle difficili e astruse discussioni dei *perspectivi* e degli scolastici. L'autore dimostra subito la sincerità schietta dei suoi propositi: « siamo sinceri — par che dica — noi non sappiamo qual è la natura della luce e uscir fuori con paroloni vuoti di significato è una vera turlupinatura! ». E continua: « Tuttavia non credo che debba dirsi temerario chi tenti di promuovere tali studi... », frase rivelatrice delle difficoltà di ambiente in cui l'autore lavorava. Come è già stato accennato sopra, in quei tempi i testi classici dei grandi maestri del passato contenevano la verità e tutta la verità. Chi osava sollevare dei dubbi e avanzare delle idee originali era subito accusato di *temerarietà*: e non era un'accusa trascurabile, equivaleva a quella di rivoluzionario. Padre Grimaldi inizia il Proemio alla sua opera proprio con una apologia del suo atteggiamento. Come il titolo del Libro primo dice esplicitamente, egli difende l'opinione « di alcuni », cioè di una minoranza, e sa di dover affrontare le accuse e l'acrimonia dell'ambiente dominante, costituito, come dice il titolo del Libro secondo, dall'agguerrita e intransigente schiera dei peripatetici. So-

[14] « De Lumine nonnisi obscura loqui possumus, quia tametsi eius praesentiam nemo non caecus ignorare possit, eiusdem tamen naturam et quiditatem penitus introspicere difficillimum est. Hinc illae ambages, et aenigmatica verborum mysteria, quibus tum difinitio luminis, tum quae illam consequuntur proprietates involvuntur, atque obtenebrantur a plurisque Philosophorum, dum eas tamen profitentur explicare se velle, ac declarare » (Francesco Maria Grimaldi, *Physico-mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, Bologna 1665, Proemio).

stanzialmente padre Grimaldi difende il suo lavoro, non soltanto col primo accenno a « certi nuovi esperimenti » (che lo mettevano subito in una posizione inattaccabile), ma poi accusando decisamente di insufficienza le idee e gli studi tradizionali. Senza mezzi termini, egli giustifica così il suo modo di procedere: finora sono stati fatti tanti discorsi, col risultato unico di nascondere sotto un cumulo di parole misteriose e prive di significato reale la effettiva ignoranza circa la natura del lume; con questi discorsi non si possono spiegare i nuovi fenomeni che ho scoperto; dunque affrontare nuovamente l'indagine in questo campo non solo non è temerario, ma è addirittura doveroso.

L'autore dichiara subito che intende accingersi a questo studio senza tenere alcun conto dell'autorità dei maestri, ma cercando di sviluppare gli esperimenti, e di interpretarli. Si sentiva lo spirito del 1600: Galileo aveva fatto scuola e le sue idee dilagavano. Tuttavia i mutamenti profondi non sono immediati e accanto a questi buoni propositi e alle loro conseguenze nel libro di padre Grimaldi si sente ancora una macchinosità dialettica che è vera eredità del passato ancora recente!

Quest'opera meriterebbe una disamina accurata e particolareggiata, perché è una vera miniera di notizie che interessano, oltre all'ottica, la fisica in generale. Ma, per quanto ci proponiamo di non dimenticare nulla di ciò che per il nostro argomento ha importanza, tuttavia ci sarà necessario andare molto sommariamente.

Il primo Libro comincia con una scoperta; una grande scoperta che ha tramandato ai posteri il nome di padre Grimaldi: *la diffrazione della luce*. Il nome è stato dato da lui ed è rimasto, nonostante che altri, e specialmente Newton, avessero tentato di cambiarlo, perché... dava noia alle loro teorie. La prima Proposizione ha per titolo: « Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directe, Refracte, ac Reflexe, sed etiam alio quodam Quarto modo, DIFFRACTE ». Segue la descrizione delle esperienze fondamentali e delle frange che appaiono quando la luce, entrando in una stanza buia attraverso un piccolo foro, lambisce degli ostacoli minuti e arriva sopra uno schermo bianco. Notoriamente in queste condizioni l'ombra non è nettamente separata dalla regione illuminata, né vi è una semplice penombra, come sarebbe giustificabile mediante le dimensioni non mai nulle della sorgente; ma si verificano dei fenomeni assai complessi, per cui la luce invade larga-

mente la zona di ombra geometrica, mentre delle frange oscure, immerse nella luce della zona illuminata, ne seguono fedelmente l'orlo.

Francamente, una tale scoperta era il peggior caso che potesse

Fig. 15 - Frange di diffrazione all'orlo dell'ombra di un ostacolo rettilineo (*De Lumine* di padre Grimaldi, p. 3).

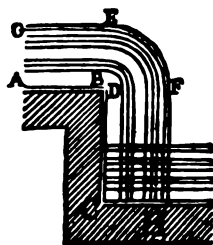



Fig. 16 - Frange di diffrazione all'orlo dell'ombra di un ostacolo accidentato (*De Lumine* di padre Grimaldi, p. 4).

capitare a uno che si accingeva a studiare la natura della luce, nelle condizioni di cultura generale dell'inizio del 1600.

Ne è ben giustificato il tono cauto del Proemio!

Dal punto di vista tecnico si deve notare che la scoperta di padre Grimaldi ha un valore notevole. È evidente che egli l'ha fatta per caso, perché nessun ragionamento dell'epoca, né suo né di altri, poteva portarlo a prevedere un fenomeno di questo tipo. Ma egli l'ha potuta fare perché si è messo nell'indirizzo di sperimentare con fascetti di luce molto sottili, cioè provenienti da sorgenti molto sottili. Egli stesso dice: « aperto nella finestra un forellino il più piccolo possibile AB, si lasci entrare per quello la luce del Sole, nella stanza altrimenti completamente oscura » [15].

Infatti va bene che la diffrazione accompagna sempre in modo inseparabile la propagazione luminosa, però gli effetti sono ben visibili soltanto con sorgenti luminose di dimensioni piccolissime, e quando si guardi per il sottile dietro ostacoli minuti, specialmente. Esistono anche fenomeni di diffrazione cospicui, ma sono rari e difficili da notarsi e soprattutto da interpretarsi.

Sembra un particolare di secondaria importanza, quasi una curiosità, eppure ci sono voluti tanti secoli prima che gli scienziati si siano decisi ad applicarlo, e anche oggi trova tanta difficoltà nel

[15] Ivi, Prop. I, N. 7.

linguaggio e nelle esperienze ottiche! In fondo si tratta di una estensione al campo fisico di quella suddivisione elementare che, come abbiamo notato nel Capitolo precedente, era stata una delle chiavi di volta per spiegare il meccanismo della visione oculare. L'indirizzo per così dire infinitesimale è stato ed è di importanza fondamentale per lo sviluppo delle ricerche ottiche.

Con questa sorgente sottile, padre Grimaldi fa due gruppi di esperienze. Il primo, interponendo un ostacolo sul cammino della luce, e osservandone l'ombra sopra uno schermo bianco; il secondo gruppo interponendo sul cono stesso di luce uno schermo opaco dotato di un altro forellino sottile, in modo da farne oltrepassare

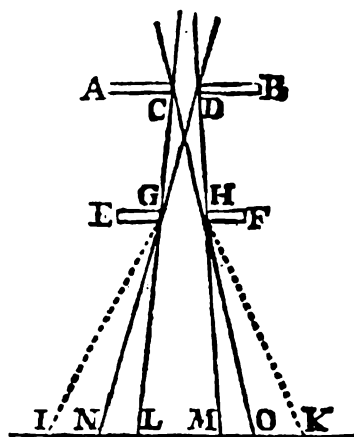



Fig. 17 - Seconda esperienza di diffrazione: attraverso un foro sottile (*De Lumine* di padre Grimaldi, p. 9).

un piccolo fascetto di luce, i cui effetti venivano ancora osservati sopra lo schermo bianco.

Nel primo caso osserva che la luce invade anche la parte secondo le previsioni geometriche riservata all'ombra; insieme che la zona d'ombra è più dilatata di quello che dovrebbe essere, cioè di quello che farebbe prevedere la proiezione geometrica dell'ostacolo dal foro luminoso sul piano dello schermo; osserva inoltre attorno all'orlo dell'ombra *tre serie*, ossia tre strisce luminose e colorate, azzurrognole verso l'interno dell'ombra e rossastre verso

l'esterno, e di intensità e di larghezza degradanti man mano che ci si allontana dall'ombra. Queste « series lucidae » (e l'autore insiste nel definire che sono « lucidae » e colorate e non ombre) seguono fedelmente i contorni, anche irregolari della zona d'ombra.

Per quanto il fenomeno appaia subito strano, diventa ancor più imbarazzante quando si osservi che in certe condizioni, delle altre « series lucidae », affini alle precedenti e pure iridate, compaiono anche nella zona d'ombra, e sempre a coppie: due, quattro e anche sei, sempre simmetricamente rispetto agli orli. Però, mentre le precedenti sono straordinariamente costanti di numero e di forma, queste nell'ombra seguono leggi assai complesse, variando facilmente di numero e di caratteristiche.

Nel secondo gruppo di esperienze padre Grimaldi nota che la traccia sullo schermo bianco impressa dal piccolo fascetto di luce che è passato attraverso il secondo forellino è molto più grande di quella prevista dalla solita proiezione geometrica, tanto da escludere ogni possibilità di equivoco in proposito. La parte centrale della traccia è bianca (« perfusam *mero* lumine » dice l'autore): gli orli sono colorati in rosso e, dice l'autore, anche in azzurro.

Egli fa molte prove: avvicinando e allontanando lo schermo bianco dall'ostacolo o dal foro; cambiando la forma, il colore, la sostanza e la disposizione dell'ostacolo o del diaframma. I risultati sono sconcertanti: perché al variare della distanza dello schermo su cui si osservano le « series lucidae » padre Grimaldi trova che « ... esse non stanno né sopra una linea retta passante per la sorgente e tangente all'ostacolo, né sopra una retta condotta dal foro al punto dello schermo su cui si osservano » [16].

D'altra parte le « series lucidae » rimangono invariate « qualunque sia il corpo opaco, inserito nel cono luminoso, sia denso, sia non denso, e sia liscio e lucido, sia ruvido e irregolare, sia duro, sia molle » [17].

[16] « ... earum progressum fieri per lineam, quae neque est in directum cum priori linea, quae a foramine recta extenditur ad extremum opaci inserti in cono radioso, neque recta a foramine ad eam partem lucidae basis coni, super qua illae repraesentantur pictae,... » (ivi, Prop. I, N. 17). Brano interessante, perché, siccome il contenuto dava molta noia ai sostenitori delle teorie corpuscolari, è stato... dimenticato, per un secolo e mezzo.

[17] « ... quodcumque tandem sit corpus illud opacum, quod cono lucido inseritur, sive densum, sive rarum, et sive laeve ac politum, sive asperum ac inaequale, sive denique durum sit, sive molle » (ivi, Prop. I, N. 18). Anche questo brano è stato volentieri... dimenticato, come si vedrà fra non molto.

Egli esclude che le « series lucidae » siano dovute a luce diretta; e non ci vuol molto, dato lo strano modo di comportarsi al variare della distanza dello schermo, come si è detto or ora; esclude che siano dovute a luce rifratta, perché non sentono la qualità della sostanza di cui è fatto l'ostacolo opaco; esclude che si tratti di luce riflessa, anche dall'orlo dell'ostacolo stesso, perché le « series » rimangono invariabili qualunque sia quest'orlo, e comunque si agiti l'ostacolo [18].

Padre Grimaldi ne conclude che la luce si deve propagare in qualche altro modo peculiare, a cui bisogna dare un nome: ed egli lo chiama *diffrazione*.

Nella II Proposizione tenta di spiegare il fenomeno; e qui naturalmente le cose si complicano. Egli stesso riconosce che è una cosa misteriosa, tuttavia cerca di darne una ragione; assimila la luce a un *fluido* e come gettando un sasso nell'acqua su questa si generano delle onde attorno al punto colpito, lo stesso deve avvenire per la luce, quasi che l'ostacolo posto nel cono luminoso agisca come il sasso sull'acqua [19].

È evidente che questa teoria è fuori di posto. Invece è degno di nota il titolo della II Proposizione: « Sembra che il lume sia un qualche cosa di fluido, capace di attraversare rapidissimamente e almeno qualche volta anche in via ondulatoria i corpi trasparenti [20]. Dunque padre Grimaldi è portato ad ammettere fin dagli inizi che la luce, « *almeno qualche volta* », deve propagarsi nei corpi trasparenti « *anche* ondulatamente ».

Padre Grimaldi fa anche molte altre esperienze sulla diffrazione, con fili sottili, con tele, con penne d'uccello, con stoffe sfilacciate, etc. (Proposizione XXXI); ma non le sviluppa sistematicamente, perché a lui interessava soltanto dimostrare che in questi casi la luce era colorata. Mancando una vera teoria del fenomeno era troppo difficile organizzare delle esperienze in zone così complesse! È già molto che egli abbia sviscerato come ha fatto la parte sperimentale delle esperienze più tipiche e semplici.

[18] Anche questa esperienza fu... riscoperta un secolo e mezzo più tardi!

[19] « Sicut enim in aqua circa lapidem tanquam centrum circulariter disponuntur undosi velut aggeres, ita circa umbram quam proijcit opacum lucido cono immersum, disponuntur lucidae illae series... » (padre Grimaldi, *op. cit.*, Prop. II, N. 16).

[20] « Lumen videtur esse quid fluidum perquam celerrime, et saltem aliquando etiam undulatim, fusum per corpora diaphana ».

Prima di procedere all'esame delle altre parti del volume, conviene osservare la sua forma nettamente polemica; così totale e così sincera che si deve escludere trattarsi unicamente di una forma retorica. Tutta l'opera ha questa forma di dibattito: tesi, dimostrazione, obbiezioni, risposte alle obbiezioni; talvolta replica alle obbiezioni stesse, e contro-replica: par di leggere i verbali di un processo. Né mancano le esplosioni da parte dell'autore in frasi violente contro l'imbecillità di coloro che si ostinavano a non credere possibili certe acrobazie teoriche!

Ebbene, nel corso di una di queste discussioni, si legge il brano seguente: « Dirai, in secondo luogo, che questa radiazione della luce è tale, perché l'aria illuminata e divenuta come una nuova sorgente di luce, crea la sua sfera di attività, e pertanto una certa luce secondaria da questa è prodotta in modo molteplice, e in modo da dare quelle numerose serie » [21].

Se ci togliamo quell'*aer*, che materializza un po' troppo il mezzo in cui si propaga la luce, il concetto espresso in queste righe è proprio quello che anche oggi serve per spiegare la diffrazione e che fu dimostrato circa un secolo e mezzo dopo padre Grimaldi.

Ma il curioso è che padre Grimaldi lo mette fra le quattro opinioni avverse (è la seconda in ordine, come indica quell'*iterum* del testo latino) e la demolisce. Gli argomenti sono così evidenti, che nessuno oserebbe dargli torto: egli infatti fa notare che se ci fossero queste attività sferiche secondarie, esse dovrebbero essere molto meno intense di quella del fascio diretto e quindi la loro azione dovrebbe essere invisibile o quasi sul fondo « continuo » prodotto dalla illuminazione diretta. D'altra parte se ci fosse questa luce emessa da questi centri secondari, si dovrebbe raccogliere anche sopra uno schermo posto di fianco al fascio, mentre in realtà non ci si vede nulla; e infine, sulla guida di queste sorgenti secondarie, non si capisce perché quella luce sia colorata, perché sia distribuita in più serie, e perché sia necessario introdurre un ostacolo nel cono luminoso per osservare il fenomeno: « Tutti i quali argomenti dimostrano con quanto diritto questa obbiezione, ossia questa risposta

[21] « Dices iterum, hanc luminis radiationem ideo esse, quia illustratus aer tamquam novum luminosum, suam activitatis spheram instituit, ideoque lumen aliquod secundarium ab ipso produci multipliciter quidem, et per plures illas series » (ivi, Prop. I, N. 21).

degli avversari, debba essere respinta »[22]. Padre Grimaldi deve aver faticato assai a respingere questa obbiezione. Eppure le sue repliche, al suo tempo, erano di una logicità insuperabile. Quello che vi è di meraviglioso in questo, come in tanti altri casi, è l'intuito umano, che tante volte rasenta la profezia. È incredibile come ci siano state delle persone, che nella prima metà del 1600 con premesse ed elementi così scarsi e semmai ingannevoli, abbiano pensato a spiegare le frange di diffrazione con un meccanismo che poi doveva essere imposto dallo svilupparsi delle conoscenze sulla luce, dopo circa due secoli!

Naturalmente, questo profeta è stato rintuzzato e convinto di errore, e il suo nome è sepolto nell'oblìo!

Abbiamo notato l'episodio, oltre che per l'interesse proprio, anche perché sta a indicare che la diffrazione è stata (e non poteva essere altrimenti) una delle argomentazioni più dibattute; è stata uno scoglio contro il quale si sono infranti i tentativi teorici dei più grandi geni; e al tempo stesso è stata la via per cui più ha progredito la conoscenza della natura della luce.

Ma torniamo all'esame dell'opera di padre Grimaldi.

Intanto egli afferma che la luce esiste. Lo dimostra non solo mediante il fenomeno della visione, che secondo l'autore è dovuta a un « agente eccitatore della potenza visiva ricevuto nell'occhio »[23] (anche nel Proemio era scritto che « nessuno non cieco poteva ignorare la presenza della luce », come è già stato ricordato); ma lo dimostra anche ricorrendo ad un argomento nuovo, di cui non ci risulta che altri prima di lui si siano valsi esplicitamente per questo scopo: la luce esiste perché riscalda i corpi. Scrive padre Grimaldi nella XXXII Proposizione (N. 8): « È certo che la luce esiste fuori dell'occhio, perché nei corpi illuminati sentiamo anche del calore come effetto della luce in quelli ricevuta... »[24].

Conclusione questa di molte esperienze e di lunghe discussioni. Egli prova dapprima che i corpi trasparenti si riscaldano molto meno di quelli opachi; e tra questi quelli neri molto più di quelli bianchi; e mette in relazione il fenomeno col maggior o minor assorbimento di luce. Egli arriva ad affermare, sempre su base speri-

[22] « Quae omnia ostendunt quam merito explodenda sit haec objectio, seu responsio adversariorum ».

[23] « determinativum potentiae visivae receptum in oculo ».

[24] « ... certum est dari lumen extra oculum, quia in corporibus illustratis sentimus etiam calorem, tamquam effectum luminis in ijsdem recepti,... ».

mentale, che non esistono corpi perfettamente trasparenti e anche quelli che sembrano tali un po' si debbono scaldare alla luce. Inoltre per ribattere l'obbiezione che il riscaldamento di un pezzo di ferro esposto al Sole fosse dovuto al calore del mezzo interposto cita un'esperienza: pone tra Sole e ferro una vasca di vetro piena di acqua fresca e corrente, e mostra che il ferro si scalda ancora.

Osserva che per scaldare una mano al Sole è necessaria la presenza del Sole; ma precisa che il calore sulla mano non è prodotto direttamente da questo, come vorrebbero alcuni filosofi avversari; invece il Sole produce il « lumen » e questo scalda la mano; se cessa di arrivare il « lumen » cessa anche il riscaldamento.

Oggi questi ragionamenti ci sembrano superflui o almeno superati; invece il libro di padre Grimaldi ne è pieno, e la discussione è portata nei particolari più riposti e meno afferrabili. Ciò dimostra quali strane concezioni erano diffuse nell'ambiente colto dell'epoca, architettate con tutte le possibili acrobazie razionalistiche. I seguaci della nuova « philosophia naturalis » si trovavano la via sbarrata ogni momento dai preconcetti dell'altra « philosophia » ed è stata un'opera titanica e di grande merito averne avuto ragione. E molto di questo merito spetta a padre Grimaldi.

Il quale cita ancora altre esperienze degne di nota: per esempio la constatazione che luci di diversa provenienza, come da fiamme, dal Sole, etc., riscaldano diversamente, anche se appaiono ugualmente luminose. E siccome qualcuno gli obbiettava che questo riscaldamento poteva essere una « qualità » della luce solare, egli invita a scaldarsi alla luce lunare, che è evidentemente luce solare rinviata.

Non si deve tacere che alcune spiegazioni non sono proprio al loro posto; come quella relativa al diverso riscaldamento di un corpo se in moto o se fermo. Ma non c'è da meravigliarsi se, più per difetto di teoria che per equivoco sperimentale, tre secoli fa venivano presi degli abbagli in questa materia.

Padre Grimaldi afferma così la sua completa convinzione della esistenza oggettiva della luce: « Se non è evidente che è la luce ciò da cui gli oggetti sono illuminati, non ci sarà mai nessuna evidenza da domandare o da sperare » [25].

[25] « Profecto, si non est evidens esse lumen id quo caetera illuminantur, non est cur ulla unquam evidentia quaeratur, aut speretur » (padre Grimaldi, *op. cit.*, Prop. XXXVIII, N. 5).

Con questa sicurezza, egli affronta l'arduo compito di definirne la essenza, la « naturam et quiditatem ». E imposta il problema in questa forma: « La luce è sostanza o accidente? ».

Per rispondere, esamina le proprietà fondamentali che l'esperienza ha attribuito alla luce: propagazione nei corpi diafani; comportamento coi corpi opachi; riflessione; rifrazione; diffrazione; colorazione; visione.

La discussione minuziosa e profonda occupa ben quattrocento pagine, e la maggior parte delle osservazioni e delle argomentazioni sono vere anche oggi, meritando l'ammirazione per la messe veramente enorme di lavoro sperimentale e razionale svolto. Naturalmente noi dovremo riassumere il tutto per sommi capi, perché non ci proponiamo di scrivere un volume doppio di quello di padre Grimaldi.

Più che da un giudice estraneo, la discussione sembra condotta da un avvocato difensore. Più volte afferma che la maggior parte dei « Filosofi occupati in Questioni più gravi » [26] non si davano troppa cura delle osservazioni e delle esperienze che i fisici andavano accumulando; e conferma che l'opinione più diffusa era « l'Opinio Peripatetica de Luminis Accidentalitate ». Egli invece si schiera dalla parte opposta, a favore dell'« Opinio *aliquorum* de Luminis Substantialitate » evidentemente opinione di minoranza; e la difende coi denti, dimostrando come in tutti i fenomeni (propagazione nel diafano, riflessione sull'opaco e sul diafano, rifrazione, colorazione, visione) le idee si potevano assestare assai bene, cioè con poche lacune, ammettendo la sostanzialità della luce, mentre si andava incontro a mille obbiezioni, volendosi mettere dalla parte della accidentalità. E dalla discussione nasce una luce che ha le proprietà di una sostanza fluida, sottilissima, celerrima, dotata di moto locale.

Però, egli stesso sente che molti degli argomenti a favore della luce sostanziale erano veramente assai stiracchiati, e che varie critiche alla accidentalità della luce non erano proprio complete. Nel II Libro, dichiara onestamente questa sua sensazione e vi riepiloga i ragionamenti fatti con le repliche a favore della tesi prima avversa.

Per amore di brevità, non entreremo nei particolari di questa discussione, perché preferiamo trattenerci un po' sulla definizione delle caratteristiche della « luce » di padre Grimaldi, dato che ciò

[26] « Philosophi, in gravioribus Quaestionibus occupati ».

ci sarà utile per seguire l'evoluzione delle idee nei tempi successivi.

La concezione della luce come Qualità (*Accidens de genere Qualitatum*) era esposta ormai a tante critiche, che non è il caso di insistervi. La concezione della luce come sostanza fluidissima e sottilissima e velocissima urtava contro difficoltà razionali non lievi: in prima linea la sua penetrazione nei corpi cosiddetti diafani.

L'argomento era di importanza vitale, perché il caso in cui la luce cammina nel vuoto, per noi sulla terra, si può dire eccezionalissimo; anche oggi, ma ancor più al tempo di padre Grimaldi; sia perché non erano ancora in voga le macchine pneumatiche, sia perché allora vigeva il concetto filosofico che la natura « aborrisse il vuoto », e quindi questo non doveva esistere affatto.

Per spiegare la trasparenza, padre Grimaldi ricorre, naturalmente, alla *porosità* della materia e riporta mille casi ed esperienze per convincere che questa qualità è diffusa in tutti i corpi. Ma dall'ammettere dei *pori*, ossia dei canalicoli estremamente minuti e frequentissimi, e far digerire la permeabilità per una materia sia pure straordinariamente fluida e sottile, come quella che doveva costituire la luce, e ciò « lungo una linea, se non geometricamente, almeno fisicamente retta » [27] e ciò ancora da qualunque parte provenisse la luce, e ciò ancora senza disturbo reciproco di quanti si vogliano fasci luminosi contemporanei, e ciò ancora senza che l'agitazione del corpo (come il vento nell'aria) disturbi la trasmissione, e ciò ancora senza che si debba ammettere per tutti i corpi, diamante compreso, una struttura inconsistente, pulverulenta e fragilissima, c'è un bel cammino da percorrere.

Tanto più che i consueti avversari non risparmiavano le obbiezioni, anche sperimentali: fra l'altro lo stesso autore cita il caso della polvere pirica, che esplodendo rimuove qualunque ostacolo; e non solo compatto, ma anche rarefatto. Figuriamoci che cosa dovrebbe fare la luce con la sua velocità!

Padre Grimaldi discute uno per uno tutti questi argomenti, e cerca di cavarne quello che può a favore della sua tesi. Tuttavia è portato a concludere che la luce non attraversa la materia diafana penetrandola direttamente, bensì in modo indiretto [28], e porta molti esempi: come il vino nell'acqua; come il vento che entra per la

[27] « ... per lineam, si non Geometrice, saltem Physice, rectam ».
[28] « Diaphanum non penetratur a lumine penetratione proprie dicta » (padre Grimaldi, *op. cit.*, Prop. IV).

finestra di uno stabile e per quanti muri trovi finisce sempre per conservare la sua direzione predominante; come l'acqua nella spugna; come il latte nella mammella [29]. E in questo va d'accordo col « tino » di Cartesio.

Padre Grimaldi non nega che qualche raggio sia intercettato dalla materia; ossia che all'uscita da un corpo diafano la luce non sia più continua, ma presenti una struttura come l'acqua che esce da un colabrodo; aggiunge però che basta che le discontinuità siano impercettibili. Infatti non esiste il diafano perfetto, ma si passa con continuità dal massimo diafano al massimo opaco, e anche questo in strati sottili diventa trasparente. L'autore quindi chiarisce la causa della durezza e della consistenza (*durities et consistentia*); porta l'esempio della calce spenta [30], che seccandosi diviene più dura e mentre prima appariva continua, poi, seccata, presenta pori sensibili « e piccole cavità ben osservabili, almeno per mezzo di un microscopio » [31].

Attribuisce cioè la durezza non alla compattezza, ma alla « unione peculiare di quelle parti solide » [32].

Inoltre fa entrare in campo il calore, e cita tante esperienze del tipo di quella della cera che da fredda e opaca e scaldata diviene trasparente, mentre le spume sono opache e divengono trasparenti quando sono condensate.

Chiama poi in causa il magnetismo: attribuisce anche all'« effluvium magneticum » una natura sostanziale e ne fa un parallelo completo con la luce.

Osserva molti fenomeni di capillarità e ne tenta una spiegazione.

Infine, dopo aver discusso (in altra parte del volume) della natura dell'arcobaleno, e aver dimostrato, non però per primo, che vi era tutta una complessa traiettoria luminosa in ogni gocciolina di acqua, ne deduce argomenti a favore della estrema sottigliezza della luce e dei pori.

Ancora un'obbiezione: se i pori non potevano esser vuoti, perché nulla in natura è vuoto, di che cosa erano pieni? Padre Grimaldi

[29] « Igitur hoc modo res concipienda est. Lumen ab eodem luminoso diffusum in toto diaphano continuatum est ut aqua in spongia, ut lac in mamilla » (ivi, Prop. VIII, N. 69).

[30] Ivi, Prop. VIII, N. 89.

[31] « ... et saltem per microscopium valde notabiles cavitatulas ».

[32] « unioni peculiari partium illarum solidarum ».

pensa che siano pieni di « purus aether »; ma avanza anche l'ipotesi che siano pieni di quella sostanza stessa che costituisce la luce, purché ferma; e che questa luce ferma, invisibile, fredda e insensibile divenga mobile quando sopraggiunga nuova luce o dal sole o da un corpo luminoso. E anche qui si sente l'influsso del « tino » di Cartesio. Padre Grimaldi non lo cita; ma in altra occasione confuta espressamente le idee di Cartesio sui colori e dimostra quindi di conoscerne l'opera.

A questo punto è interessante un'ipotesi sull'origine della luce solare perché evidentemente gli avversari della sostanzialità della luce non aspettavano a sollevare il quesito della sorte del Sole, obbligato da tanti millenni a emettere di questa materia luminosa. Padre Grimaldi si occupa di controbattere l'idea della contrazione che dovrebbe subire il Sole in conseguenza della continua emissione di luce sostanziale. Egli cita Keplero in proposito, e ritiene indubbio che il Sole dalla creazione ai tempi nostri è diminuito; ma riferendosi alle prime misure del diametro solare fatte dai Caldei, conclude che dall'epoca di questi ad allora il Sole dovrebbe essere diminuito al massimo di un minuto primo, perché tale è l'incertezza delle misure. Con questa contrazione si potrebbe spiegare benissimo l'emissione di luce in quei secoli; e si può star sicuri che il Sole durerà fino al Giudizio Universale.

Un'altra osservazione storicamente interessante. Il titolo della Proposizione X: « Lumen non propagatur in diaphano cum influxu effectivo partis in partem ipsius luminis » dimostra subito che l'autore prende posizione nettamente negativa di fronte a un'idea che sembra assai diffusa a quell'epoca e che abbiamo già citato in una delle spiegazioni che gli *avversari* davano della diffrazione: l'idea cioè che la luce si propaghi per azioni sferiche secondarie. In sostanza questo è il concetto basilare che più tardi è stato attribuito al principio di Huyghens.

Le principali ragioni dell'opposizione di padre Grimaldi sono: quando si ammette questo tipo di propagazione, i punti raggiunti divengono a lor volta sorgenti di luce e debbono irradiare tutt'intorno: sfericamente. Ciò è contrario alla esperienza della propagazione rettilinea della luce. Analogamente sarebbe impossibile, sempre secondo l'autore, ritrovare le leggi della riflessione e della rifrazione su queste basi. E questo basta per demolire l'idea della propagazione per azioni sferiche secondarie.

In questo ragionamento padre Grimaldi è stato seguito fedelmente per oltre un secolo!

È veramente interessante, per la storia, la sicurezza espressa in questo ragionamento dallo scopritore della diffrazione, cioè del fenomeno meglio spiegato col meccanismo delle propagazioni sferiche secondarie; e la sicurezza dello scopritore stesso nell'affermare in questa occasione la forma nettamente rettilinea della traiettoria della luce per confermare la propria tesi; e ciò proprio citando le condizioni sperimentali in cui aveva scoperto la diffrazione [33]. È un fatto che rimuovere dei concetti o dei preconcetti *elementari*, cioè profondi, è un'opera molto dura e difficile!

Eppure a quell'epoca il concetto della propagazione successiva per sorgenti secondarie che irradiano sfericamente doveva essere molto familiare e molto trattato, perché nello stesso libro di padre Grimaldi vengono citati due esempi che sono stati dimenticati, mentre sono indicatissimi per renderne l'idea, anche dal punto di vista didattico: uno è quello dell'incendio, che si propaga sprizzando scintille, ciascuna delle quali dove arriva suscita un nuovo incendio, naturalmente circolare; e così si ha l'impressione che sia l'incendio centrale a propagarsi. L'altro esempio è quello di un pezzo di ghiaccio esposto a uno stretto fascio di luce solare: prima si fonde la parte colpita; poi via via le parti circostanti, anche non illuminate.

E con tutto questo padre Grimaldi si ritiene sicuro di aver dimostrato l'assurdità di questo tipo di propagazione per la luce.

Concludendo, la sua concezione sulla natura porosa della materia e sulla natura della luce, si riassume nelle sue stesse parole: « Dico che non è al di sopra delle forze della Divina Onnipotenza che esista una sostanza corporea porosa con continuità, come si è spiegato a proposito dei corpi diafani; e che esista una sostanza pure corporea, così sottile, fluida, e irradiata con moto veloce e intenso, come è stato detto della luce; ... » [34].

Passiamo al tema della riflessione.

[33] « Puto non esse cur probetur, lumen de facto procedere per *solam* rectam lineam, et non habere vim diffundendi, seu propagandi se quoquoversus. Id enim statim apparet, si inspiciatur quomodo per tenue foraminulum radius luminis introductus in obscurum cubiculum, recta procedat, nec ad latera spargat aliquid luminis notabiliter observabilis ».

[34] « ... Dico non esse supra vires Divinae Omnipotentiae, quod detur substantia corporea continue porosa, ut de diaphanis explicatum est; et quod detur substantia item corporea, adeo subtilis, fluida, celeri ac valido impetu diffusa, ut de lumine dictum est;... » (padre Grimaldi, *op. cit.*, Prop. VIII, N. 91).

Il meccanismo della riflessione di una luce materiale è evidente. Padre Grimaldi dice appunto che il difficile sarebbe spiegare il meccanismo della riflessione di una luce accidentale.

Però non è da credersi che siano tutte rose neanche per la prima tesi. Studiando la riflessione sui corpi lucidi e su quelli rugosi, su quelli chiari e su quelli scuri, su quelli bianchi e su quelli colorati, padre Grimaldi trova che alcune volte la luce si colora, altre volte no; alcune volte segue le leggi della riflessione di Euclide, altre volte si diffonde tutt'intorno. Dall'esame di ciascuno di questi casi egli è portato a concludere che qualche volta la luce si riflette sulla superficie esterna del corpo (come sulla superficie lucida di un vetro colorato) e altre volte deve penetrare un pochino nell'interno del corpo e poi uscirne.

Intanto però egli trova che la percentuale della luce riflessa cresce col crescere dell'angolo d'incidenza (misurato alla maniera moderna; perché a quell'epoca chiamavano angolo d'incidenza quello che il raggio fa con la superficie). E poi fa due osservazioni degne di particolare rilievo.

Una riguarda la riflessione sulle due facce di una lamina di vetro, immersa nell'aria e limitata da facce parallele o quasi. La riflessione sulla prima faccia è presto spiegata: il vetro è più denso dell'aria, ha meno pori, e una percentuale della luce, non trovando la via in cui infilarsi nel vetro, deve tornare nell'aria; ma perché la luce penetrata nel vetro si riflette in parte, al momento di passare di nuovo nell'aria, attraverso la seconda superficie? L'argomento diventa ancora più sibillino quando all'aria si sostituisce l'acqua, a contatto con la superficie di emergenza dal vetro: l'acqua è certo più densa dell'aria ed invece l'intensità della luce riflessa sull'acqua è inferiore a quella della luce riflessa sull'aria.

Padre Grimaldi rimane perplesso; tenta di spiegare la cosa con la cattiva corrispondenza delle bocche dei pori all'uscita del vetro con quelli all'ingresso nel gas o nel liquido. Ma conclude: « Colui che concilierà bene queste cose, avrà eliminato tutta questa difficoltà per niente lieve e, aggiungendo luce al lume, avrà bene meritato della di lei chiarezza, circondata ora presso la maggior parte delle persone da molte tenebre di falsità » [35].

[35] « Haec qui bene conciliaverit, is totam hanc difficultatem non sane laevem sustulerit, et lumini lucem addens, de illius claritate apud plerosque multis falsitatum tenebris obvoluta bene merebitur » (ivi, Prop. III, N. 25).

L'altra osservazione è il tentativo di dare una « dimostrazione » razionale della legge della riflessione. Egli vi arriva non considerando un raggio unico, e ricorrendo a un modello Cartesiano, ma considerando un cilindro di raggi e notando che soltanto in quelle condizioni geometriche richieste dalla legge di Euclide rimane costante la sezione del fascio, e quindi è possibile la riflessione in relazione alla frequenza dei pori nel mezzo in cui la luce procede. Il che significa che il fluido di padre Grimaldi doveva essere dotato anche di una sua densità, caratteristica del mezzo in cui si propagava e che ne vincolava la traiettoria in modo da essere conservata costante.

Il concetto è intuito più che espresso, e fra l'altro sarebbe stato facile demolirlo col comportamento degli specchi curvi; però è largamente utilizzato a proposito della rifrazione.

Passando alla quale, padre Grimaldi, naturalmente, comincia col mettere in evidenza la grave difficoltà di spiegare il fenomeno con l'ipotesi della luce accidentale; poi fa una rassegna delle numerose teorie avanzate sulla base dell'ipotesi sostanziale. In generale egli trova tutte queste teorie soddisfacenti per spiegare la rifrazione della luce nel passaggio da un mezzo meno denso a uno più denso, perché si poteva accusare l'aumento di resistenza al passaggio della luce come responsabile della flessione della traiettoria; come del resto aveva già accennato anche Alhazen. Ma rimaneva inesplicabile perché la luce doveva deviare passando dal mezzo più denso, dove era già, in uno meno denso. Arrivando al caso limite, se i filetti di luce, uscendo dalla sostanza incontrassero il vuoto, perché dovrebbero deviare, anziché continuare nella loro traiettoria rettilinea, in base al principio d'inerzia? Padre Grimaldi ne conclude che nessuno degli autori che si erano occupati dell'argomento, per quanto fossero stati pochi, era riuscito soddisfacente.

Segue un riassunto delle teorie suddette, che merita di essere riportato per sommi capi.

La prima si appoggiava alla diversa velocità della luce nei due mezzi separati dalla superficie rifrangente. Il ragionamento non regge se si considera un raggio isolato; ma si basa sulla considerazione di un cilindro di raggi, come costituenti un tutto collegato: il che è notevole. Infatti non vi è ragione perché un mobile lanciato in linea retta in un ambiente sia pure vischioso, debba deviare se incontra un aumento di viscosità, sia pure attraverso una superficie di discontinuità. Né ha molto senso parlare di inclinazione rispetto

a questa superficie, per un proiettile isolato, dal punto di vista fisico. Invece i vari raggi non venivano considerati indipendenti, e con questo si veniva ad introdurre un concetto affine a quello di *fronte* perpendicolare alla direzione di propagazione (quello che, chiamato oggi *fronte d'onda*, costituisce uno dei concetti fondamentali dell'ottica). Ne seguiva pertanto la dimostrazione ben nota ed elementare che se il fascio giunge obliquamente sopra la superficie di separazione dei due mezzi, deve deviare in modo da essere meno inclinato sulla perpendicolare alla superficie suddetta nel mezzo in cui la velocità di propagazione è minore; e ciò per conservare la normalità del fronte rispetto al raggio.

Però queste « tendenze », questa luce che « ama » rimanere unita, ecc., non soddisfano più alla nuova ottica, e per quanto su queste basi il fenomeno della rifrazione venisse rappresentato bene dal lato formale, non sembra che il ragionamento soddisfacesse gran ché; e padre Grimaldi lo riporta con parere negativo.

Esistevano poi « putantes lucem in minutissimos globulos resolutam esse », che cioè consideravano la luce come composta di tante sferette e un raggio lo immaginavano come un cilindretto contenente più sfere, anche in una sezione normale. Al contatto obliquo con una superficie di maggior resistenza, le sfere di un fianco vengono ritardate prima di quelle dell'altro, e il raggio viene sollecitato a piegarsi verso la normale alla superficie. Ma anche contro questo modello, veramente assai artificioso e sostanzialmente non diverso dal precedente, il giudizio è negativo.

Altri ancora facevano appello ad una specie di rotazione che le sferette costituenti la luce dovevano subire nell'incontro obliquo con la solita superficie; ma anche questa teoria non soddisfa.

Viene anche riportata la teoria di Cartesio (senza citarlo); invece viene messo bene in evidenza che essa richiede un aumento di velocità nel mezzo più denso, perché l'avvicinamento alla normale comporta necessariamente un aumento della componente del moto parallela alla normale stessa, e padre Grimaldi non esita a dichiarare: « Veramente ritengo che questa opinione per se stessa e per il solo enunciato appare abbastanza inverosimile » [36].

[36] « Verum existimo hanc opinionem per se et per solam ipsius expositionem satis apparere alienam a verisimili» (ivi, Prop. XIX, N. 15).

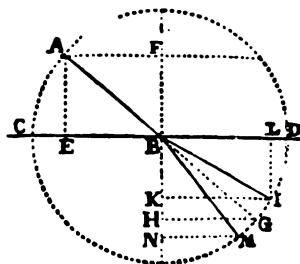



Fig. 18 - Schema della teoria della rifrazione, sostenuta da Cartesio (*De Lumine* di padre Grimaldi, p. 175).

Finalmente, dopo aver demolito le teorie « degli altri », passa a esporre la propria, basata sostanzialmente sul concetto che l'avvicinamento alla normale di un fascio incidente obliquamente sopra una superficie rifrangente implica un allargamento della sezione del fascio stesso; e ciò avviene in realtà, perché obbligato dalla necessità di compensare con questo allargamento della sezione, la minor frequenza di pori nel corpo più denso. Egli intitola la XX Proposizione, dove espone questa teoria: « Reddere *veram* rationem de Refractione Luminis »; però si ha l'impressione che lo dica... per convincersene lui stesso. Non si può dire che sia una teoria molto brillante e persuasiva, quando si tenga presente quali obbiezioni erano già state fatte alla analoga teoria della riflessione.

La rifrazione della luce rimane ancora un mistero.

E veniamo all'argomento del *colore*.

In tutta la filosofia dei secoli precedenti, il colore ha costituito un grave mistero, a proposito del quale sono state escogitate le idee più strane e più divergenti, ma tutte concordi in un principio: che la luce fosse una cosa e il colore un'altra, nettamente distinta dalla prima.

Anche quando si parlava di luce uscente dall'occhio, non si parlava mai di colore che uscisse dall'occhio, ma la luce andava fuori a trovare « le forme e i colori ». Lo stesso Alhazen parla sempre di « lumen » o di « lux », e di « color illuminatus ».

Il colore era una qualità dell'oggetto, e quando si parlava di « scorze », queste si portavano dietro anche il colore.

Quando la luce assunse esistenza oggettiva, a sé stante, il colore

ne era rimasto separato: la luce era incolore, come abbiamo detto al principio di questo Capitolo.

Ancora al principio del 1600, come è testimoniato dai brani riportati dalla *Margarita philosophica*, e da quanto ne dice Cartesio, il colore era considerato qualche cosa di paragonabile alla « forma » dei corpi, e la visione dei colori era spiegata con un meccanismo detto delle « species visuales intentionales », paragonabili alle « èidola » di buona memoria. La luce bianca, ormai completamente estraniata, aveva la funzione di veicolo del colore verso gli occhi dell'osservatore. La situazione si può riassumere così: « la filosofia aveva ceduto la luce alla fisica, ma tratteneva ancora in suo possesso il colore ».

Era un possesso che doveva durar poco. Già abbiamo parlato dell'attacco di Cartesio contro le « species intentionales »; ma i suoi argomenti erano troppo blandi: avevano più l'aria di analogie a scopo divulgativo che di vere concezioni teoriche. Ci voleva ben altro per vincere la sterminata e agguerrita schiera dei peripatetici detentori delle cattedre del 1600!

Chi ha condotto il primo attacco a fondo in materia è stato padre Grimaldi. Egli fa una serie sistematica di esperienze e di ragionamenti, che meriterebbe di essere riportata per intero; ma non ce lo possiamo permettere. La discussione verte sopra argomenti che a noi del secolo ventesimo non sono mai neppure passati per la testa perché, subito fin dai primi studi, ci è stato messo davanti un modello di luce e di colore che ci ha convinti e avvinti e tacitati. Però, quanto è stato duro il cammino per arrivare a quel modello!

Padre Grimaldi si mette nella condizione di considerare il « Lumen non coloratum » e studia quali processi sono necessari per colorarlo. Come primo passo dimostra che la luce può esser colorata per riflessione, sola e pura, cioè senza l'intervento del cambiamento di mezzo diafano, e senza rifrazione propriamente detta. Le esperienze al riguardo sono così semplici che non è il caso di intrattenercisi.

Poi passa a dimostrare che la riflessione non è causa necessaria per la colorazione della luce, perché questa può colorarsi anche per sola rifrazione. Le esperienze al riguardo, che tutti noi conosciamo bene, meritano però qualche nota. La prima è fatta mandando un fascio di luce solare sopra un piano bianco che fa da fondo a una vasca piena d'acqua: la luce così subisce un'unica rifrazione alla superficie superiore del liquido. L'autore nota *due* colori, agli estremi

del fascio, il rosso e il ceruleo, ma questo più visibile di quell'altro.

In altra esperienza, manda la luce solare attraverso un prisma equilatero con 60 gradi di angolo rifrangente. Anche in questo caso egli non spinge la sottigliezza del fascio quanto era necessario per vedere bene i risultati. Strano questo fatto, per cui nella storia dell'ottica si manifesta sempre tanta riluttanza a ridurre sottili le sor-

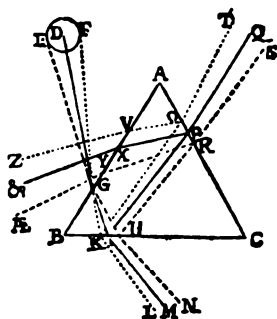



Fig. 19 La rifrazione attraverso un prisma a 60 gradi (*De Lumine* di padre Grimaldi, p. 257).

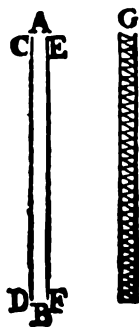



Fig. 20 Schema del raggio, nella teoria ondulatoria di padre Grimaldi (*De Lumine*, p. 342). Si noti che le vibrazioni sono rappresentate *trasversali*. Idea che più tardi doveva costituire una difficile e importante conquista.

genti e i pennelli luminosi. Come abbiamo già notato, padre Grimaldi deve la sua scoperta della diffrazione all'aver impiegato dei fori sottili per far entrare la luce del Sole nel suo laboratorio; però poi non ha più diaframmato questo fascio, che ha notoriamente una apertura angolare di 32 primi. Una volta l'ha fatto, veramente, e ha scoperto la diffrazione dietro i fori; ma se avesse continuato a adoperare i filetti di luce così realizzati, quante altre cose avrebbe potuto trovare!

Invece, anche nell'esperienza col prisma impiega la luce del Sole, ma la limita con un solo forellino; evidentemente la grandezza angolare del fascio gli ha mascherato tante cose, che altrimenti gli sarebbero balzate agli occhi. Nelle condizioni in cui opera, invece, egli nota soltanto la colorazione rossa a un estremo del

fascio, quella azzurra dalla parte opposta, e una tonalità giallastra nel mezzo.

Continuando nella sua dimostrazione a proposito della natura dei colori, egli passa a dimostrare che la luce si può colorare senza ricorrere alla riflessione, né alla rifrazione, né al cambiamento di mezzo diafano: e cioè per diffrazione. Riferisce molte esperienze, fatte con strutture reticolari, con fori e con fessure, e mostra che le frange così ottenute sono colorate: senza riflessione, senza rifrazione, senza cambiamento di sostanza.

Conclusione: se la luce si colorava con ciascuno di questi modi, ma nessuno di essi era indispensabile, la modificazione doveva avvenire nella luce stessa, come nella sola cosa che in tutte queste esperienze fosse sempre presente. Il titolo della XXXII Proposizione suona appunto così: « Lumen per solam aliquam ipsius modificationem intrinsecam, et nulla alia entitate coassumpta, transit aliquando in Colorem ut aiunt, Apparentem ».

E padre Grimaldi, stabilito questo primo punto essenziale, passa a definire quella « aliquam... modificationem intrinsecam », dandone una teoria, che appare non convincente e incompleta; ma che contiene degli elementi che, ancora una volta, meritano il nome di profezie: tanto si avvicinano alle idee dei giorni nostri.

Premette padre Grimaldi una larga serie di esperienze, eseguite nelle condizioni più disparate, con lamine riflettenti e rifrangenti, a facce piane e parallele oppure prismatiche e anche con lenti, studiandone quella che oggi si chiama l'aberrazione cromatica; e trova che è vera quasi sempre l'osservazione, già fatta da altri (che egli non cita) che la colorazione della luce è sempre accompagnata da una variazione di « costipazione » del fascio luminoso, e precisamente dove viene più addensata compare il rosso e dove rimane più rarefatta compare l'azzurro; però nota che nella riflessione con specchi sferici concavi e convessi i fasci luminosi si addensano e si rarefanno, ma non mutano di colore né lo perdono.

Fa anche un'altra esperienza interessante, per quanto il risultato sia stato male interpretato. Mandando sul prisma consueto a 60 gradi un fascio di luce solare, attraverso però un vetro colorato, trova che, ancora, dopo la rifrazione si vede il solito gruppo di colori come con la luce bianca, sia pure meno vivaci.

L'intento era razionale, ma la sorte ha giocato un brutto tiro allo sperimentatore: i vetri cosiddetti colorati (e padre Grimaldi fra l'altro precisa di aver scelto un vetro che non desse diretta-

mente uno dei colori da lui attribuiti all'azione del prisma, cioè rosso, giallo e azzurro, che ancora si ottengono con dei filtri buoni) lasciano passare una larghissima zona di spettro luminoso, attenuando soltanto qualche regione rispetto alle altre. Questo infortunio ha ritardato un po' le conclusioni; ma da tutto l'insieme delle sue esperienze, padre Grimaldi trae la conclusione espressa nel titolo della XLIII Proposizione:

La modificazione della luce, per forza della quale essa si colora permanentemente e apparentemente (come si dice), o meglio si rende sensibile con la qualifica di colore, non improbabilmente si può dire che sia una certa sua ondulazione minutissimamente fluttuante, come un tremito di diffusione, con una certa oscillazione finissima, mediante la quale avviene che essa luce stimoli l'organo della visione con una particolare e determinata attività [37].

Quando, nei libri di scienza, si arriva alla fine, si trova la ragione di ciò che gli autori hanno scritto nelle prime pagine. Così accade nel libro di Euclide, così in quello di Alhazen, così in questo di padre Grimaldi. E in altri che troveremo tra breve accadrà lo stesso. Ora si trova la ragione della frase già ricordata a proposito della II Proposizione, dove l'Autore annunciava che la luce si propagava nel diafano « *etiam undulatim* »; in fondo in fondo, tutta l'opera è imperniata su questa ipotesi ondulatoria che affiora soltanto verso la fine, per spiegare la natura del colore.

Le argomentazioni che padre Grimaldi porta a sostegno di questa sua idea sono molto interessanti. Egli giustifica la grande varietà di colori possibili, quando fossero dovuti ad altrettante ondulazioni diverse, ricorrendo a due esempi: uno, quello della scrittura a mano, che può dare una varietà infinita di lettere, intenzionalmente uguali, ma in realtà sempre diverse una dall'altra, l'altro, quello del suono, che dà tanta varietà di toni, appunto con altrettante varietà di ondulazioni.

Egli poi mostra che su queste basi si possono spiegar bene le esperienze fatte sulla riflessione, sulla rifrazione, sulla filtrazione e

[37] « Luminis modificatio, vi cuius illud tam permanenter, quam (ut aiunt) apparenter coloratur, seu potius sit sensibile sub ratione coloris non improbabiliter dici potest esse *determinata ipsius Undulatio minutissime crispata*, et quidem velut tremor diffusionis, cum certa fluitatione subtilissima, qua fiat ut illud propria, ac determinata applicatione afficiat sensorium visionis » (ivi, Prop. XLIII, Titolo).

anche sulla diffrazione, avvicinandosi con questo alle conclusioni del secolo successivo.

Si intrattiene anche a studiare i colori e ne definisce alcuni semplici e gli altri li considera come combinazione di questi; e dal modo come ne parla si deduce che a quell'epoca anche la cosiddetta « teoria dei colori » era oggetto delle discussioni comuni. E non c'è da meravigliarsene, dal momento che la pittura esisteva da tanti secoli. Interessante però il fatto che i colori semplici fossero già ridotti a tre: rosso, giallo e azzurro. La tricromia era già nata.

Tornando alla teoria ondulatoria di padre Grimaldi, egli accenna al problema di misurare la frequenza delle vibrazioni, ma vi rinunzia, per le difficoltà evidenti. Dove invece insiste a lungo è nella difesa della sua concezione circa la natura del colore, concezione che non sembra fosse troppo bene accolta. In questa circostanza cita anche la teoria di Cartesio e ne mette in evidenza i lati deboli.

Agli avversari non risparmia rabbuffi e insulti. Ciò sta ad indicare che la polemica deve essere stata violenta. Qualche citazione non sarà fuori di luogo, perché serve a lumeggiare l'opera preziosa di padre Grimaldi in questa fase della lotta per un progresso, per una conquista di cui oggi non ci rendiamo neppure conto, tanto la riteniamo facile e naturale.

Col sottotitolo: « Subvertitur principale fundamentum Opinantium in contrarium » l'autore al N. 39 della XLV Proposizione scrive:

> Le cose dette fin qui sembravano certissimamente sufficienti a dimostrare la verità di questa nostra proposizione. Tuttavia, perché discutendo varie volte di ciò con uomini dottissimi, mi accorsi che essi più e più volte ricorrevano alla evidenza oculare, che essi dicono di avere del colore, permanentemente infisso nei corpi visibili e non autoluminosi, come di una cosa realmente distinta dalla luce; e che non era possibile con nessun argomento smuoverli da questo sacro altare, a cui si erano attaccati coi denti;...

riporta la serie degli argomenti in pro e in contro, finché a un certo punto sbotta: « Euge. Praeclaram sane philosophiam, quae quoties mihi decantatur toties irritat bilem » [38].

Contro questi filosofi padre Grimaldi ha dovuto anche difendersi dall'accusa che egli con queste teorie tendeva a trasformare la visione in una operazione di tatto. Ed egli riferisce, in proposito, il caso

[38] Ivi, Prop. XLV, N. 41.

di uno che davanti a Serenissimi Principi aveva dato evidente prova di saper distinguere i colori al tatto, con occhi comunque bendati e con la testa rivolta da un'altra parte; e riferisce che di questa dimostrazione era stato steso atto ufficiale.

Ma se volessimo riferire tutte le notizie e le osservazioni interessanti contenute nel volume di padre Grimaldi, ne avremmo per un bel pezzo.

Per terminare la serie, ricorderemo che egli non conosceva la velocità della luce, ma ne dimostra la necessità, dimostra cioè che non può essere infinita e ne preconizza la misura sopra una base di 30 o 40 miglia, predisponendo le cose in modo che la luce la percorra due volte.

Non si può disconoscere che padre Grimaldi lascia una luce molto più definita di quella che aveva trovato. Non si tratta più di un quid incolore, dotato di propagazione rettilinea, capace di riflettersi, di rifrangersi e di stimolare la visione degli oggetti illuminati. È un fluido materiale, animato di velocità altissima, ma non infinita; che si propaga per raggi rettilinei, ma non semplicemente definiti dalla loro direzione, bensì dotati di una ondulazione ad altissima frequenza, che li rende atti a stimolare la sensazione di colore; che si riflette, secondo le leggi di Euclide, ma con modificazioni più o meno sensibili nella direzione, nella intensità, nella ondulazione a seconda della natura del corpo che riflette; che si rifrange con complicazioni analoghe; che si diffrange passando intorno agli oggetti sottili o per le aperture ristrette; che riscalda i corpi quando ne viene assorbita; che li attraversa quando non li riscalda; che ha strette analogie coll'effluvio magnetico.

Ripensandoci bene, padre Grimaldi trova che la materialità non è proprio necessariamente dimostrata e apertamente lo dichiara, mettendo in evidenza le ragioni che possono giustificare anche la natura accidentale della luce. Però ci tiene molto a confermare che, anche con questa nuova forma di luce, rimane confermata la sua idea sulla natura del colore, e non si può più affermare che esso sia una cosa distinta dalla luce e residente nei corpi « ut vulgo putatur ».

Padre Grimaldi morì soltanto quarantacinquenne, il 28 dicembre 1663. Aveva appena terminato il volume di cui ci siamo occupati, e che uscì nel 1665.

A quell'epoca Huyghens aveva 36 anni e Newton ne aveva 23. Il volume di padre Grimaldi è dunque prezioso, non soltanto per il contenuto tecnico, in cui primeggia la scoperta della diffrazione;

ma lo è anche storicamente perché ci documenta lo stato di cultura e le idee dominanti nel campo della fisica della materia e della luce quando gli altri grandi scienziati vi hanno apportato il contributo del loro pensiero.

Per quanto lo studio dell'ambiente culturale delle varie epoche riguardi solo indirettamente la nostra storia, vale la pena di rilevare che nell'opera del padre Grimaldi si sentono gli effetti del duro dirigismo esercitato dalle autorità del tempo sulla cultura. Un primo sintomo è fornito dall'assenza completa di citazioni, fatta eccezione solo per Aristotele: non potendo citare gli autori di contributi importanti perché si trattava di protestanti o di mussulmani, padre Grimaldi ha adottato un criterio imparziale, non citando nessuno.

Ma ben più interessante è un altro rilievo: il volume è stato pubblicato ben 61 anni dopo i *Paralipomena ad Vitellionem* del Keplero, e di questa opera non vi è alcuna traccia; non solo non vengono adottate le idee nuove del Keplero, ma padre Grimaldi dedica una lunga proposizione, la 40ª del Libro primo, allo studio della visione, ma senza alcun accenno all'immagine retinica, bensì ancora discutendo se le specie erano necessarie o meno. Il che vuol dire che ora, a più di sessanta anni di distanza le idee del Keplero erano ormai dimenticate. Ciò sta a significare che non soltanto esse idee non erano state apprezzate dall'ambiente filosofico e matematico del tempo, ma non erano state neppure giudicate degne di considerazione e di studio; anzi, dato che erano così innovatrici e così filosoficamente contrastanti coi concetti dominanti nei testi classici circa la visione, furono boicottate mediante l'arma più potente che si usa in casi del genere: la congiura del silenzio.

Padre Grimaldi dedicò tutta la sua vita, purtroppo assai breve, all'insegnamento e alla ricerca nel Collegio dei Gesuiti di Bologna. Il volume che egli aveva appena finito di scrivere quando fu assalito dalla malattia che lo doveva portare in breve tempo alla tomba, fu curato con amore fraterno dal padre Giovan Battista Riccioli, astronomo molto noto, con cui il padre Grimaldi aveva lungamente e attivamente collaborato in numerose osservazioni.

Però, perché non si deduca da queste notizie che l'ostruzionismo alle idee del Keplero circa il meccanismo della visione vigeva soltanto nell'ambiente controllato dalle autorità religiose, è opportuno rilevare che uguale decorso si riscontra in tutte le pubblicazioni del tempo. Basti ricordare a questo proposito il volume *La lumière*, del De la Chambre (lo stesso ricordato a proposito degli studi di Pierre

Fermat), che era una grossa autorità nell'ambiente parigino, dato che era « Conseiller du Roy en ses Conseils et son premier Medicin Ordinaire » (come è scritto sul frontespizio stesso del libro). L'opera è dedicata al cardinal Mazarino, ed è dotata di un privilegio speciale del re. Fu pubblicata a Parigi nel 1662, dall'editore Jacques d'Allin. Si tratta dunque di un'opera dotata di tutti i più alti crismi ufficiali; ebbene, là dove tratta della visione si legge: « ... D'où il faut conclure, ou que la lumière produit ces images et les portes avec elles dans les milieux e dans les yeux, ou bien qu'elle les y trouve toutes portées et les rend seulement sensibles » [39]. « Les images » di cui qui il De la Chambre parla, in altre parti del volume sono chiamate anche « espèces ». Siamo dunque ancora al punto dove era G. B. Della Porta. Dell'ottica nuova, di quella ottica che poi dovrà divenire l'ottica dominante fino ai giorni nostri, si è persa ogni traccia. Non c'è da meravigliarsi, dunque, se anche oggi le origini di questa ottica sono sconosciute dalla quasi totalità dei cultori anche dell'ottica stessa.

Ma l'evoluzione delle idee, ora, nel nuovo clima filosofico generato dalla grande rivoluzione del secolo XVII sta assumendo un ritmo sempre più accelerato, e se ne avranno presto le conseguenze.

Nuovi elementi a questa documentazione ci vengono portati da un volume molto interessante, che uscì pure nel 1665: la *Micrographia* di Robert Hooke [40].

È certo un libro interessante per la storia degli strumenti ottici e particolarmente per il microscopio. Rigurgita di osservazioni fatte abilmente e accuratamente con questo strumento, che allora era agli inizi della sua gloriosa carriera. Interessa anche al nostro scopo, perché contiene i primi studi sistematici sopra un fenomeno di grande importanza, quale la colorazione delle lamine sottili.

Nel corso delle sue osservazioni microscopiche, Hooke rivolse l'attenzione alle lamine sottilissime che si formano sull'acciaio e sui metalli in genere dopo che sono stati arroventati, alle bolle di sapone, al vetro soffiato in foglie finissime, ecc., e ne notò la colorazione. Da un'indagine sistematica del fenomeno, dedusse le circostanze seguenti:

[39] De la Chambre, *La lumière*, Ed. Jacques d'Allin, Paris 1662, p. 252.
[40] Nacque nel 1635 a Freshwater, nell'isola di Wight, e morì nel 1703 a Londra. Fu segretario della Società Reale di Londra.

1) la colorazione appare tutte le volte che c'è una lamina di un corpo trasparente, molto sottile e limitata da corpi riflettenti, di rifrangenza diversa da quella del materiale della lamina;

2) non è necessario che i corpi limitanti la lamina siano della stessa natura entrambi;

3) non è necessario che la lamina sia di spessore uniforme; se lo è, anche la colorazione è uniforme; se lo spessore è variabile come in una lente, la colorazione assume l'aspetto di anelli concentrici di vario colore; dei quali in quello centrale i colori sono distribuiti nell'ordine seguente: rosso, giallo, verde, violetto, etc.;

4) perché la colorazione sia visibile occorre che lo spessore della lamina sia compreso fra un massimo e un minimo; se lo spessore è eccessivo si vede tutta una illuminazione uniforme e bianca;

5) non vi è necessità di luce speciale perché il fenomeno si presenti; cioè può essere qualunque l'intensità e la posizione della sorgente;

6) non vi è bisogno di un salto da ombra a luce, per far apparire la colorazione delle lamine.

È meraviglioso come Hooke sia giunto a mettere insieme tante conclusioni: nelle poche pagine che dedica all'argomento dà qualche dimostrazione, ma aggiunge anche che la presenza della lamina è ipotetica, perché mai è riuscito a vederla e a misurarla, anche col più potente dei suoi microscopi. Eppure la massima parte delle sue conclusioni debbono essere confermate anche oggi.

Egli ne trae argomento per demolire l'ipotesi di Cartesio, che voleva la luce fatta di globuli, e i colori dovuti a una rotazione di questi. Siccome Cartesio aveva previsto che questa rotazione dovesse nascere al momento della rifrazione e doveva essere annullata quando la luce già rifratta subiva una seconda rifrazione contraria, come nelle lamine a facce piane e parallele, Hooke fa notare giustamente che nelle sue lamine sottili erano rispettate proprio queste condizioni, eppure la colorazione permaneva.

Anche la sesta delle conclusioni di Hooke, che a prima vista oggi sembra assai strana, contiene una replica alle idee di Cartesio: in conseguenza del fatto, notato più volte, che a quell'epoca si sperimentava con fasci di ampiezza angolare assai notevole, Cartesio ed altri avevano osservato che la colorazione si presentava sempre al passaggio da una zona luminosa verso un'ombra. Ebbene ora gli vien fatto notare che nelle lamine sottili questa condizione non è più necessaria.

Con questo Hooke considera demolita l'idea cartesiana, e passa a costruire una nuova teoria, che veramente valore intrinseco non ne ha molto, ma merita di essere ricordata come documento del carattere del periodo di cui ci occupiamo: periodo preliminare e preparatorio, in cui spuntavano mille tentativi destinati più o meno a cadere, ma a preparare quella che sarà poi la teoria trionfante.

Hooke attribuisce la luce a un *moto* della materia, moto che deve essere *vibratorio*; perché se fosse di altra natura porterebbe al disfacimento dell'oggetto luminoso. Cita, come esperienza cruciale, il caso del diamante, che sfregato, percosso e anche riscaldato (« e che il calore faccia capo a un moto delle parti interne, come ho detto sopra, è generalmente accettato » aggiunge) rimane luminoso anche per qualche tempo dopo, finché dura il movimento impresso da questi agenti; esperienza che egli attribuisce al Clayton.

Per la propagazione nel diafano, *postula* che esistano corpi suscettibili di questo movimento, con velocità altissima, ma non infinita (e anche in questo si mette contro Cartesio), e in linea retta, secondo i raggi di sfere, come le onde sull'acqua colpita da una pietra. Lungo queste linee si propagano dunque degli *impulsi* (« orbicular pulse ») che nella luce bianca sono trasversali, mentre come effetto della rifrazione debbono assumere una certa obliquità rispetto al raggio. D'altra parte, penetrando nei corpi (e qui finalmente Hooke è d'accordo con Cartesio, ma proprio nell'ammettere che nei corpi più densi la velocità di propagazione sia maggiore) la parte anteriore di un impulso obliquato si smussa e si indebolisce. Dal complesso ne segue la definizione di colore: « Il blu è un'impressione sulla rètina di un impulso di luce obliquo e complesso, in cui la parte più debole precede e la più forte segue. Il rosso è un'impressione sulla rètina di un impulso di luce obliquo e complesso, in cui la parte più forte precede e la più debole segue » [41].

Come idea è assai ingegnosa!

Ebbene Hooke applica il modello alla spiegazione dei colori delle lamine sottili, facendo combinare l'impulso riflesso dalla faccia posteriore con quello riflesso dalla faccia anteriore, in modo

[41] « Blue is an impression on the Retina of an oblique an confused pulse of light, whose weakest part precedes and whose strongest follows. Red is an impression on the Retina of an oblique and confus'd pulse of light, whose strongest part precedes, and whose weakest part follows » (Robert Hooke, *Micrographia*, Londra 1665, IX Osservazione).

da dare un impulso complessivo, il quale naturalmente deve avere le caratteristiche o del rosso o del blu o dei colori intermedi.

Egli conclude la IX Osservazione del suo libro con queste parole: « Così io ho, con la massima brevità che mi è stato possibile, cercato di spiegare (almeno *ipoteticamente*) le cause del fenomeno precedentemente descritto, nella considerazione del quale io sono stato il più particolareggiato.

In primo luogo perché penso che ciò che ho dato di nuovo è in grado di spiegare tutti i fenomeni dei colori, non soltanto quelli che appaiono col prisma, nelle gocce di acqua o arcobaleno, e nei corpi laminari o piani, ma di tutti quelli che sono nel mondo (*but all that are in the world*), siano essi corpi fluidi o solidi, spessi o sottili, trasparenti o sensibilmente opachi... ».

Egli doveva essere entusiasta della sua teoria e non doveva essere il solo ad apprezzarla, avendo riscosso le lodi anche di Huyghens; ma non doveva avere molto seguito. Però bisogna riconoscere che nei ragionamenti di Hooke c'è qualche spunto che più tardi, dopo circa centocinquanta anni, doveva essere ripreso e sviluppato e portato al livello di fenomeno fondamentale dell'ottica. Hooke era stato profeta quando aveva previsto che i fenomeni del tipo di quelli della colorazione delle lamine sottili avrebbero servito da piloti per guidare la costruzione delle teorie sulla natura della luce.

Abbiamo insistito un po' sul contenuto delle opere di Cartesio, di padre Grimaldi e di Hooke, perché le idee loro hanno avuto certamente un'influenza decisiva sul corso della nostra storia. I loro scritti rispecchiano il fervore della discussione dell'epoca circa la natura della luce, e palesano la perplessità generale; sia di Cartesio, che con olimpica serenità combina tutte le ipotesi più discordanti; sia di padre Grimaldi, che dopo tanto indagare e analizzare non trova argomenti decisivi a favore della « substantia », piuttosto che dell'« accidens »; sia di Hooke, che per quanto dichiari di esser pronto a spiegare tutti i colori del mondo, però trova l'argomento così poco importante da tentare di esporlo nel modo più conciso possibile [42]. È da giurarsi che se egli avesse avuto la convinzione di aver risolto il problema della natura della luce, vi avrebbe dedicato qualche pagina di più, e forse anche un volume apposta...

[42] « with as mach brevity as I was able... » (ivi, p. 67).

Intanto però i colori non sono più « species visuales intentionales », ma sono modificazioni della luce; la legge della rifrazione ha trovato quella forma che si può dire definitiva e che rappresenterà un'arma formidabile in mano degli ottici geometrici e degli sperimentatori; si conosce la diffrazione; affiorano i primi fenomeni di interferenza a reclamare i loro diritti sulla natura della luce.

L'orizzonte è tutt'altro che sereno. Anche Galileo ne discute nel *Saggiatore* comparso nel 1619; vi si affaticano la mente, oltre il già citato Marco Antonio De Dominis, arcivescovo di Spalato, Marcus Marci de Kronland [43] che pubblicò nel 1648 un'opera dal titolo *Thaumantias Iris, liber de arcu coelesti, deque colorum apparentium natura, ortu et causis*; Isacco Voss da Leyda, che pubblicò nel 1648 il *De lucis natura et proprietate* [44]; e altri minori concorrono nella discussione, arrecando il loro contributo di raziocinio, di esperienza e di fantasia, per sciogliere questo formidabile enigma della natura.

Nel 1669 una nuova scoperta venne ad accrescere la perplessità dell'affaticata schiera degli studiosi del problema del lume. Come risulta da ciò che ne scrive padre Grimaldi, la ragione per cui il lume, passando da un mezzo ad un altro di « densità » o di « trasparenza » diversa viene deviato dalla sua traiettoria d'incidenza sulla superficie di separazione è tuttora un mistero, anche se padre Grimaldi nella XX Proposizione del Libro primo si vanta di darne la *vera* spiegazione. La mole stessa della discussione che vi è dedicata dimostra come il problema sia ancora in alto mare; perché quando di un fenomeno se ne conosce la spiegazione soddisfacente, si riporta quella e quelle provvisorie precedenti passano nel museo di storia della scienza.

Ora, proprio mentre con tanti sforzi si cercava di risolvere un caso così impenetrabile, un naturalista danese, Erasmus Bartholin [45], scoprì la birifrangenza dello spato d'Islanda: un fascio di lume, penetrando in un cristallo di tale spato si divide in due fasci, di cui uno, detto *ordinario*, segue la nota legge della rifrazione, mentre l'altro, detto *straordinario*, ne segue un'altra molto più complicata. Come vedremo, questa scoperta avrà molto sviluppo nel seguito della nostra storia.

[43] Nacque nel 1595 a Landskron in Boemia e morì a Praga nel 1667.

[44] Isacco Voss nacque a Leyda nel 1618 e morì a Windsor nel 1689.

[45] Erasmus Bartholin nacque a Roeskilde nel 1625 e morì a Copenaghen nel 1698. Pubblicò la scoperta che lo ha reso famoso in *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici quibus mira et insolita refractio detegitur*, Copenaghen 1669.

Pochi anni dopo, nel 1676, la storia della luce può registrare un altro successo molto importante: viene misurata la velocità del lume. Il merito spetta ad uno studioso danese, genero di Erasmus Bartholin: Ole (o Olaf) Roemer [46].

La velocità del lume era stato uno degli argomenti più discussi nel passato, specialmente da quando Alkindi, Alhazen e la scuola araba in genere aveva insistito sull'esistenza del quid esterno, fisico, necessario perché l'occhio umano potesse vedere. Naturalmente i pareri furono subito contrastanti: chi lo voleva dotato di una velocità, sia pure elevatissima, ma finita, e chi invece lo riteneva dotato di velocità infinita. Il fallimento di tutti i tentativi fatti per misurare tale velocità costituiva un forte argomento a favore di coloro che la ritenevano infinita. Però le opinioni in proposito più che altro erano determinate da considerazioni metafisiche e talvolta anche da osservazioni banali male interpretate.

D'altra parte vi era una certa confusione, perché alcuni parlavano della velocità dei raggi visuali (e allora il fatto che appena uno apriva gli occhi vedeva oggetti lontanissimi come le stelle poteva giustificare la conclusione che i raggi stessi avevano una velocità infinita) altri invece parlavano della velocità delle specie (e alcuni ripetevano lo stesso discorso, come per i raggi visuali, senza accorgersi che ora, per le specie, non era più logico) e altri invece della velocità del lume. In sostanza era anche questo uno dei grossi misteri relativi alla luce.

Tanto per dimostrare come l'argomento ancora nel XVII secolo fosse in alto mare, è il caso di mettere l'accento sul modo di procedere di Cartesio. Già a proposito delle idee sulla natura del lume, si è dovuto rilevare che nei discorsi di Cartesio non vi è molta organicità e coerenza; ma a proposito della velocità del lume, le sue idee sono particolarmente contrastanti. Perché egli si dimostrò sempre un tenace sostenitore della velocità infinita; ma allora non si capisce proprio con quale decorso logico egli abbia esteso al lume la legge della rifrazione, studiata e dimostrata per i proiettili di artiglieria. Misteri dell'animo umano.

[46] Ole Roemer nacque ad Aarhus (Jutland) nel 1644 e morì a Copenaghen nel 1710. Studiò e lavorò a Parigi, dove fra l'altro il re Luigi XIV lo nominò precettore del Delfino. Le sue osservazioni che lo portarono alla misura della velocità del lume furono eseguite nell'Osservatorio Astronomico di Parigi, allora diretto da Giovan Domenico Cassini. Il Roemer dovette lasciare la Francia, nel 1685, in seguito alla revoca dell'editto di Nantes da parte di Luigi XIV, essendo egli protestante. Da allora in poi svolse la sua attività a Copenaghen.

D'altra parte Galileo, nonostante la sua convinzione che quella circa la natura del lume fosse una « disperata cognizione » (cioè egli non nutrisse nessuna speranza di arrivare a sapere quale fosse tale natura), propose la misura della sua velocità mediante segnali luminosi a distanza di qualche decina di miglia. Ma l'esito non poteva essere che negativo, dati i mezzi sperimentali del tempo.

La storia ora assume un carattere interessante: nell'agosto del 1675 il Cassini segnalò una *seconde inégalité* nel moto dei satelliti attorno a Giove. Come è noto la *première inégalité* era quella considerata relativamente al Sole. Ebbene il Cassini, nel trattare l'argomento scrisse che questa « seconda diseguaglianza sembra dipendere dal fatto che la luce impiega qualche tempo a venire dal satellite fino a noi, e che essa impiega circa da dieci a undici minuti a percorrere uno spazio eguale al semi-diametro dell'orbita terrestre » [47]. Egli sarebbe stato l'ideatore del metodo con cui è stata eseguita la prima misura della velocità del lume, se poi, chi sa per quali ragioni, non avesse recisamente rinnegato la sua spiegazione della seconda diseguaglianza.

A quanto si sa, l'argomento fu ripreso dal Roemer; e nel settembre del 1676 egli, mediante calcoli fatti appunto sulla base dell'idea avanzata dal Cassini, preannunciò che l'eclisse del primo satellite di Giove, prevista per il 9 novembre successivo, si sarebbe verificata 10 minuti più tardi. Le osservazioni fatte in tal giorno confermarono brillantemente la profezia. La velocità del lume era misurata.

Il 21 novembre 1676 il Roemer espose all'Accademia delle Scienze il risultato delle sue misure e la spiegazione. Il 7 dicembre la notizia pubblicata sul « Journal des Savants » [48] e l'anno dopo, in inglese, sulle « Philosophical Transactions » [49]. Naturalmente la notizia incontrò una forte opposizione. Incredibile a dirsi, ma gli oppositori più ostili, ed anche più efficaci, data la loro grande autorità, furono proprio Cassini e Descartes. Ma le ostilità e le contrarietà oggi sono dimenticate, e la misura della velocità del lume eseguita dal Roemer nel 1676 è considerata ormai una conquista definitiva.

[47] « ... seconde inégalité paroit venir de ce que la lumière emploie quelque temps à venir du satellite jusqu'à nous, et qu'elle met environ dix à onze minutes à parcourir un espace égal au demi-diamètre de l'orbite terrestre » (Montucla, *Histoire des matémathiques*, vol. II, p. 580).

[48] 7 dicembre 1767, pp. 233-6. Cfr. I. B. Cohen, *Roemer and the first determination of the velocity of light (1676)*, XXXI, Isis 1940, pp. 327-79.

[49] « Philosophical Transactions », XII, 1967, pp. 893-4.

La *Thaumantias Liber, de arcu coelesti, deque colorum apparentium natura, ortu et causis*, pubblicato da Marcus Marci de Kronland a Praga nel 1648 (si noti bene la data) è un libro di carattere tradizionale, in cui le idee nuove già lanciate da varie parti e in particolare dal Keplero e dal Cartesio ancora non trovano il posto che avrebbero meritato. Però vi sono, anche qui, delle novità di un interesse del tutto particolare.

Come dice il titolo, l'opera è dedicata allo studio del meraviglioso fenomeno dell'arcobaleno, ma per arrivare a darne una spiegazione era necessario esporre una teoria dei colori « apparenti ». Ciò che appunto il Marci fa, però, come si è detto, in base agli schemi medioevali. Tuttavia il Marci descrive numerosi esperimenti eseguiti mediante i prismi a sezione triangolare, ed è particolarmente notevole che, nonostante le difficoltà opposte dal concetto di colore di cui egli fa uso, egli pervenga a enunciare in maniera esplicita la « *corrispondenza biunivoca tra colore e rifrangibilità del lume* ». Per quanto è noto, è questa la prima volta che una corrispondenza del genere viene enunciata, almeno in maniera esplicita. Data l'importanza storica di questo rilievo, vale la pena di riportarne la documentazione. A pagina 99 della *Thaumantias* il « Theorema XVIII » ha l'enunciato seguente: « *Non si possono avere né lo stesso colore con una rifrazione diversa, né colori diversi con la stessa rifrazione* » [50]. Non vi è dubbio che questo enunciato contiene proprio l'affermazione della corrispondenza biunivoca tra colore e rifrangibilità. Non solo questo concetto è riaffermato e sviluppato nella dimostrazione del teorema, ma porta anche a un « Corollarium »: « *Ne consegue che i raggi portanti lo stesso colore sono paralleli* » [51]. Affiora qui il concetto medioevale che il colore fosse una « specie » che si propagava lungo i raggi; però l'autore assegna lo stesso colore a raggi (che emergono da prisma) secondo una stessa direzione, cioè paralleli, fra loro. Non vi è dubbio che il Marci aveva delle idee molto precise circa il *decorso* (non circa la spiegazione) della rifrazione e della dispersione attraverso un prisma triangolare. È interessante rilevare, a questo proposito, che il Marci ha raggiunto nelle sue misure una

[50] *Theorema XVIII: Neque idem color a diversa refractione, neque ab aedem plures colores esse possunt* (Marcus Marci de Kronland, *Thaumantia Liber*, Praga 1648, p. 99).

[51] *Corollarium: Sequitur radios eundem colorem deferentes esse parallelos* (ivi, p. 100).

precisione maggiore dei predecessori (noti) e anche dei successori, anche di molti anni dopo, perché tutti gli altri sperimentavano utilizzando il lume del Sole, che è una sorgente non puntiforme, ma dotata di un'apertura angolare di mezzo grado; il Marci invece sperimentò usando come sorgente la fiamma di una candela, che è molto più sottile del Sole, e ciò gli permise delle osservazioni ben più accurate. È ben noto infatti che oggi, per lo studio degli spettri ottenuti mediante un prisma, si usa come sorgente una fessura sottilissima.

Molto interessanti sono anche i teoremi XIX e XX: il primo dice: *Un raggio colorato che subisce una riflessione successiva non cambia tono di colore*; e il secondo: *Un raggio colorato che subisce una rifrazione ulteriore non cambia la specie del colore*. Come se non bastasse, il Marci insiste ancora sulla corrispondenza biunivoca fra colore e deviazione per rifrazione, nei teoremi XXI e XXII; il primo dice: *La luce similare ed ineguale produce, con la stessa rifrazione colori uguali*. E il secondo: *Luce dissimilare ed eguale, con la stessa rifrazione produce colori disuguali*. Il Marci stesso spiega, nel corso della dimostrazione di questi teoremi, il significato che intende attribuire ai termini impiegati: egli chiama *similari* i fasci di lume che incidono con lo stesso angolo sul prisma; e chiama *disuguali* i fasci di intensità diversa. Questa cura del Marci di dichiarare indipendente il colore dall'intensità del fascio di lume rappresenta un tentativo di svincolarsi dalle idee medioevali, secondo le quali i colori *apparenti* generati per rifrazione erano legati all'intensità luminosa del fascio: il giallo e il verde dovevano vedersi dove il fascio era più intenso, mentre il rosso e il violetto rappresentavano come una transizione verso il nero del buio.

Con ciò il Marci collega esplicitamente il colore con la deviazione subita per rifrazione attraverso il prisma e lo svincola anche dall'intensità del fascio.

Non vi è dubbio che, pur su basi che tra breve saranno demolite e ricostruite con elementi nuovi, il Marci ha innestato delle idee che si possono dire definitive.

Ma, a proposito di quest'opera del Marci, è il caso di ripetere ciò che è stato già rilevato per quella del Keplero: non ebbe accoglienza favorevole da alcuna parte e fu ben presto dimenticata. Tra breve vedremo le sue conclusioni ora documentate ritornare alla ribalta come grandi scoperte, ma con nome diverso. L'intervento del Marci è tornato alla luce in questo tempo, perché la sua opera

è stata oggetto di studio accurato in occasione del terzo centenario della sua morte.

Passiamo ora ad esaminare l'opera dei due grandi, Isacco Newton e Christian Huyghens, che con la loro fama dovevano gettare molta ombra su molti dei predecessori e dei contemporanei.

NEWTON E HUYGHENS

Per quanto Christian Huyghens fosse più anziano di Isacco Newton di ben 13 anni, dovremo dare logicamente la precedenza a questi [1], perché il primo si occupò delle teorie sulla natura della luce soltanto in età avanzata, mentre prima si dedicò, sia pure con molto successo, a questioni di ottica geometrica e tecnica, che esulano dal nostro campo. Il suo *Traité de la lumière* è del 1684.

Invece Newton concentrò la sua opera subito fin dalle prime armi sull'argomento più angoscioso del secolo: i suoi primi lavori, a partire dal 1666, riguardano appunto la natura e le proprietà dei colori.

Il Newton stesso, in una lettera del 6 febbraio 1671/2 diretta a Oldenburg, allora segretario della Royal Society, racconta come fu che iniziò i suoi studi sui colori e quindi sull'ottica; la lettera comincia proprio così:

Sir,

To perform my late promise to you, I shall without further ceremony acquaint you, that in the beginning of the Year 1666 (at which time I applied my self to the grinding of Optick glasses of other figures than *Spherical*) I procured me a Triangular glass-Prisme, to try therewith the celebrated *Phaenomena of colours*. And in order thereto having darkened my chamber, and made a small hole in my window shuts, to let in a convenient quantity of the Sun light, I placed my Prisme at its entrance,

[1] Christian Huyghens nacque a L'Aia nel 1629 e vi morì nel 1695. Isaac Newton nacque a Whoolsthorpe nel 1642 e morì a Londra nel 1726.

that it might be thereby refracted to the opposite wall. It was at first a very pleasing divertisement, to view the vivid and intense colours produced thereby; but after a while applying my self to consider them more circumspectly, I became surprised to see them in an *oblong* form; wich according to the received law of Refraction, I expected should have been circular...

La lettera continua con una minuziosa descrizione dei ragionamenti coi quali il giovane Newton cercò di trovare la ragione di questo allungamento, di questa notevole ovalizzazione della figura che egli si sarebbe attesa rotonda; in un primo tempo egli l'attribuì a difetti del vetro e fece delle prove che lo portarono ad escludere certamente questa causa; arrivò a pensare che i raggi, dopo aver attraversato il prisma, procedessero per una via curva (e cita l'analogia con le palle da tennis, quando vengono colpite con la racchetta obliquamente) e fece delle prove per escludere anche questa spiegazione; giunse così ad eseguire quello che egli stesso chiama *Experimentum Crucis*: invia il fascio emergente dal prisma sopra uno schermo provvisto di numerosi fori, in modo che da un foro emerga un fascetto particolare; fa incidere questo fascetto parziale sopra un altro prisma con gli spigoli paralleli a quelli del precedente e osserva che l'allungamento della figura non si presenta più. Newton ne conclude che l'ovalizzazione della figura colorata osservata inizialmente era dovuta alla costituzione del fascio iniziale incidente sul prisma: questo doveva essere composto di tanti elementi diversamente rifrangibili. Egli scrive, sempre nella lettera stessa ad Oldenburg: « And so the true cause of the lenght of that Image was detected to be no other, than that *Light* consists of *Rays differently refrangible*, which, without any respect to a difference in their incidence, were, according to their degrees of refrangibility, trasmitted towards divers parts of the wall ».

E la lettera continua: « When I understood this, I left off my aforesaid Glass-works; for I saw, that the perfection of Telescopes was hitherto limited, not so much for want of glasses truly figured according the prescriptions of Optick Authors, (which all men have hitherto imagined), as because that Light itself is a *Heterogeneous mixture of differently refrangible Rays* ». Pensò subito di costruire telescopi aventi per obbiettivo uno specchio parabolico e si dedicò alla costruzione di strumenti del genere, con cui eseguì

subito delle osservazioni dei satelliti di Giove e delle fasi di Venere. Pensò anche di costruire un microscopio catottrico [2].

Vale la pena di rilevare, da questi cenni, che il giovane Newton (allora poco più che ventenne) si era dedicato alla costruzione di cannocchiali, probabilmente come fanno oggi gli astrofili; e i suoi interessi erano prettamente pratici; tanto è vero che appena resosi conto della eterogeneità del lume, pensa di evitarne le conseguenze dannose, ricorrendo alla costruzione di strumenti catottrici.

È anche il caso di rilevare, ancora una volta, che la scoperta da lui fatta della ovalizzazione del fascio rifratto dal prisma è stata la conseguenza dell'uso di una sorgente piccolissima: il foro fatto nell'imposta della sua stanza, come aveva fatto padre Grimaldi. Ancora una volta questa prassi ha dato dei risultati importanti; e pur tuttavia era di impiego ancora tanto raro.

Non è poi privo di interesse il fatto che questi esperimenti del Newton siano stati iniziati l'anno successivo a quello in cui è stato pubblicato il *De Lumine* di padre Grimaldi. Non vi è dubbio che il Newton conosceva questa opera, come vedremo in seguito; e probabilmente anche l'accenno fatto nella lettera citata ai « celebrati fenomeni dei colori » si riferisce alla larga trattazione che padre Grimaldi aveva fatto nel suo volume a proposito del comportamento dei prismi e alla natura dei colori.

Infine si deve notare che il Newton, dopo aver continuato per qualche tempo nel suo lavoro, diciamo, pratico, si rende conto del grande interesse che potevano avere degli studi teorico-sperimentali nel campo dei colori, e abbandona telescopi e microscopi per dedicarsi allo sviluppo degli esperimenti per la via scientifica. In questo periodo deve presumibilmente esser nata nella sua mente l'idea fondamentale, che lo ha conquistato, lo ha entusiasmato e che lo ha guidato per tutta la sua vita sulla via che egli non ha voluto più abbandonare, nonostante che lo portasse ad urtare contro scogli insuperabili e gli procurasse delle gravi amarezze.

Perché, come risulta dalla sintesi già ricordata a proposito del *De Lumine* di padre Grimaldi, la rifrazione era ancora a quel tempo un mistero. Il nuovo indirizzo del metodo scientifico ora non si contentava più, come per il passato, della *descrizione* dei fenomeni naturali; ora si esigeva la *spiegazione*, ossia in parole povere, di

[2] *The correspondence of Isaac Newton*, pubblicata dalla Royal Society, vol. I, 1959, p. 92 e p. 95.

tutto si domandava il modello meccanico. Della rifrazione nessuno riusciva a dare questo modello.

Al Newton è venuta un'idea grandiosa: « ...if the Rays of light should possibly be globular bodies, ... » (come scrive egli stesso nella lettera citata) essi debbono essere attratti dai corpi materiali e pertanto, se l'incidenza è obliqua, debbono essere deviati dalla loro traiettoria d'incidenza. Non solo, ma se i globuli hanno massa diversa, debbono subire una deviazione diversa, ossia debbono essere diversamente rifrangibili. Ecco trovata la chiave dei fenomeni osservati; è evidente: il fascio incidente, che appare bianco, è composto di corpuscoli di tante masse diverse; la rifrazione attraverso un prisma li ordina e li seleziona e li istrada per direzioni diverse a seconda della loro massa... e del loro colore; dunque colore e rifrangibilità sono due fenomeni collegati.

Il quadro si presentava veramente affascinante e non vi è da meravigliarsi se il giovane Newton ne è rimasto entusiasmato e si è dedicato a fondo alla dimostrazione sperimentale che ne desse la prova indiscutibile.

L'8 febbraio 1671/2 fu letta alla Royal Society la lettera che dava la prima notizia degli esperimenti e delle idee del Newton. Essa fu poi pubblicata nelle « Philosophical Transactions » del 1672, vol. VII, p. 3075.

La storia degli esperimenti e della teoria che fu chiamata newtonianesimo è molto complessa e molto interessante. Ne dovremo trattare a lungo, anche per le ripercussioni che ha avuto e che non sono ancora del tutto finite. Per averne una visione d'insieme che permetta di valutarla nel suo significato e nel suo valore il più obbiettivamente possibile, conviene analizzare l'opera che la contiene e la presenta ordinatamente: l'*Optice*, che il Newton pubblicò soltanto quarant'anni più tardi, nel 1704.

Il fatto che l'*Optice* porti una data così tarda ci autorizza a ritenere che essa compendi gli studi e le idee dell'autore nella forma definitiva; anche perché ne furono fatte in seguito varie edizioni, senza cambiamenti sostanziali. D'altra parte essa esce la prima volta quarant'anni dopo il *De Lumine* di padre Grimaldi, e vent'anni dopo il *Traité de la lumière* di Huyghens; quindi è ragionevole attendersene un quadro sintetico del contributo effettivo di Newton al progresso dell'ottica.

L'opera è divisa in tre Libri. Il primo, a sua volta suddiviso in due parti, tratta della rifrazione, della dispersione, dell'analisi e

della sintesi dei colori; il secondo, diviso in quattro parti, comprende lo studio e l'interpretazione dei fenomeni oggi detti d'interferenza; il terzo tratta della diffrazione. Il primo libro comprende anche le premesse e le definizioni; l'ultimo contiene le conclusioni.

È un'opera d'interesse grandissimo, e degna di essere analizzata minutamente; se però vogliamo seguire spregiudicatamente la evoluzione delle idee sulla natura della luce in questo e nel secolo successivo, ci sarà necessario mettere in evidenza non soltanto i pregi, e ve ne sono di veramente grandi, ma anche i punti deboli, sui quali dovremo insistere alquanto, perché rappresentano un caso di interesse eccezionale per la storia della scienza.

Come abbiamo accennato in altre occasioni, per interpretare bene quello che Newton scrive nelle primissime pagine, bisogna averne già letto e criticato il contenuto fino alla fine.

Egli comincia con questi propositi: « Nello scrivere questo libro, non mi sono proposto di spiegare le proprietà della luce da certe ipotesi preposte; ma di comprovare queste proprietà, semplicemente esposte, per mezzo del ragionamento e degli esperimenti. Per questo scopo ho stabilito di premettere le seguenti definizioni e assiomi » [3].

Si direbbe che egli avesse voluto dimostrare sperimentalmente le « Propositiones » esposte nel corso del volume senza alcuna premessa o alcun preconcetto teorico. Più volte, sotto il titolo di alcune « Propositiones » si trova scritto: « Probatio ab experimentis desumpta ». Un simile proposito l'abbiamo trovato espresso più volte anche nel *De Lumine* di padre Grimaldi: nel '600 era di moda farsi una bandiera di quest'indirizzo, come per reazione al metodo classico dei peripatetici. Non si può negare che, come proposito, sia eccellente, ma non si può negare neppure che, in realtà, si tratta soltanto di un'illusione. Il grande pregio delle teorie è proprio quello di servire di guida e di indirizzo agli esperimenti; ed anzi non si possono fare esperimenti sistematici e conclusivi senza una guida teorica più o meno palese o sottintesa.

E l'esame critico delle « Definitiones » mostra che, tutto sommato, anche Newton ha fatto come fanno tutti i ricercatori.

La prima Definizione è importantissima: « Per raggi di luce

[3] « In hoc libro conscribendo, non mihi institutum fuit, ut positis certis hypothesibus, luminis proprietates exinde explicarem; sed ut istas proprietates simpliciter propositas, ratione duntaxat experimentisque comprobarem. Quem in finem, definitiones et axiomata subjecta praemittere statui » (Isaac Newton, *Optice*, Ed. Bousquet, Losanna 1740, p. 1).

intendo le sue parti minime, così quelle successive nelle medesime linee, come quelle contemporanee in linee diverse »[4].

È senza dubbio un'idea nuova; una concezione nuova del raggio luminoso. Però c'è da domandarsi se qui già non c'è compresa la teoria corpuscolare della luce; o in caso contrario, che cosa significa quella definizione.

Segue una spiegazione, così interessante, che merita di essere riportata per intero:

> Infatti la luce può essere composta di parti sia successive, sia contemporanee; in quanto che si può intercettare in un medesimo luogo quel tanto di luce che in un momento vi arriva, e lasciar passare quello che arriva nel momento successivo; analogamente in uno stesso istante si può intercettare della luce in un luogo qualunque e lasciarla passare in un altro luogo qualunque. Infatti quella parte di luce che viene intercettata non può essere quella stessa che puoi lasciar passare. La minima luce o la minima parte di luce, che da sola, senza la luce restante o può essere intercettata o da sola può propagarsi; o che può esercitare o subire qualche azione, che il resto della luce nello stesso tempo non esercita o non subisce; questa è quella che chiamo *raggio* di luce.

Oggi si direbbe un *quanto*!

Si noti bene, dunque: per Newton il raggio non è la traiettoria della luce, ma è quel « minimum lumen » comunque isolabile, indipendentemente dalla sua traiettoria. Su questa idea, egli introduce delle frasi che oggi pure sono usate, ma convenzionalmente, mentre egli le usava in senso proprio; come quando in certi testi si legge che i raggi *vanno* a passare per un punto, alla lettera significa che i raggi camminano; mentre in realtà si intende dire che qualche cosa cammina lungo quelle traiettorie chiamate raggi.

Ciò è precisato anche dalla Definizione II, che riguarda il concetto di rifrangibilità:

> La rifrangibilità dei raggi di luce è quella *disposizione*, per la quale sono atti, nel passare da un corpo trasparente, o mezzo, in un altro, a essere rifratti, ossia a essere deviati. E la maggior o minor rifrangibilità dei raggi è quella disposizione per cui sono atti a parità di incidenza sopra uno stesso mezzo, ad essere deviati più o meno.

[4] « Definitio I: Per radios luminis, minimas ipsius partes intelligo, easque tam in eisdem lineis successivas, quam contemporaneas in diversis » (ivi, p. 2).

Anche a questo punto la persona spregiudicata si deve domandare che cosa Newton ha voluto dire con questa definizione. Non si può disconoscere che egli vi ha già introdotto delle idee nuove, in quanto ha *postulato* che la rifrangibilità, e anche la variazione di rifrangibilità (ossia la dispersione) è una « dispositio » dei raggi e non dei mezzi.

Non ci sarebbe nulla di male in tutto questo, se la spiegazione aggiunta non complicasse un po' le idee su quelle che sono le vere intenzioni dell'autore:

I matematici in generale si rappresentano essere i raggi di luce delle linee condotte dal corpo luminoso al corpo illuminato, e la rifrazione di questi raggi essere una flessione o una rottura di queste rette, nel passaggio da un mezzo ad un altro. Anche a proposito dei raggi e delle rifrazioni (come intese sopra) ciò si potrebbe dire, se la luce si propagasse in un istante. Però siccome dalle equazioni dei tempi delle eclissi dei satelliti di Giove sembra doversi concludere che la luce si propaga in un certo intervallo di tempo [5], cosicché impiega circa sette minuti a venire dal Sole alla Terra; *preferii definire così vagamente* i raggi e le rifrazioni, affinché qualunque cosa si concludesse a proposito della propagazione della luce, tuttavia queste definizioni fossero vere e sicure da una parte o dall'altra.

Si dovrebbe concluderne che Newton era animato dalle intenzioni migliori; ma bisogna anche riconoscere che si proponeva un compito superiore alle forze umane.

E così pure nella III Definizione: « La riflessibilità dei raggi è quella *disposizione* per cui sono atti, quando incidono sopra un *mezzo qualunque*, a essere rimandati dalla superficie del medesimo nuovamente nello stesso mezzo da cui provenivano. E sono raggi più o meno riflessibili quelli che sono riflessi più facilmente o più difficilmente ».

Perché postulare come attributo dei raggi e non del corpo riflettente la riflessibilità e la variazione di riflessibilità? Questa definizione racchiude delle idee complicatissime, che si potranno intendere soltanto dopo che avremo criticato la maggior parte dell'opera di Newton.

[5] Allusione evidente alle misure di Ole Roemer. Si noti per altro la forma cauta e tutt'altro che impegnativa, usata dall'autore; sintomo evidente che le idee del Roemer erano considerate tutt'altro che pacifiche.

Nelle definizioni seguenti sono contemplati gli angoli d'incidenza, di riflessione, di rifrazione, i loro seni, e il significato di alcune locuzioni, come: luce omogenea, colori primari, omogenei, semplici.

Seguono otto « Assiomi », di cui i primi cinque contemplano le leggi della riflessione e della rifrazione nelle forme di Euclide e di Cartesio. Gli altri tre riassumono i capisaldi dell'ottica geometrica elementare, cioè la formazione delle immagini reali e virtuali. Per non fraintendere il significato di quella parola « Assioma », è bene riferire le parole stesse dell'autore al riguardo: « In questi assiomi e nelle loro chiose mi pare di avere esposto brevemente e per sommi capi tutto ciò che in precedenza è stato tramandato in fatto di ottica ». E si ritiene autorizzato a servirsi del loro contenuto per spiegare le cose che sta per svolgere, basandocisi come se fossero dei princìpi.

Su queste basi, Newton comincia la sua costruzione.

La parte sperimentale è veramente magnifica; condotta con metodo, con accuratezza, con criterio quantitativo, con rara abilità. Le prove sono sempre accompagnate dalle controprove e rivelano nel giovine fisico la stoffa del grande sperimentatore. Però non sempre egli riesce ad essere l'osservatore imparziale e oggettivo; perché in più riprese chi osservava e sperimentava era l'uomo che voleva dimostrare e vedere la conferma della sua teoria.

Egli riprende le esperienze di Cartesio e di padre Grimaldi e di tanti altri, sulla rifrazione attraverso i prismi e le conduce con eccellente maestria e ne trae risultati che fanno epoca. Egli lavora ancora col fascio di luce diretta del Sole, cioè di 32 primi di apertura, ma osservando a distanza di parecchi metri dal prisma e usando prismi di sostanze molto dispersive può fare delle misure accurate e trarne delle spiegazioni nuove. Specialmente indovinata è l'esperienza dei due prismi incrociati: questa, sia pure confortata da tutte le altre esperienze di questo primo gruppo, porta l'autore ad affermare l'esistenza di una corrispondenza biunivoca tra rifrangibilità e colore della luce. Egli non solo può confermare che il seno dell'angolo d'incidenza e quello dell'angolo di rifrazione sono in rapporto costante; ma può andar oltre, e affermare che i predecessori che dicevano di aver fatto le misure in merito si dovevano esser limitati alla stima di valori medi, perché « non avendo ancora notato la diversa rifrangibilità, credevano che tutti i raggi si flettessero in una mede-

sima proporzione ». Egli invece può dimostrare che questo rapporto è diverso per i diversi colori e, per quanto le condizioni fossero difficili, ne fa una misura accurata.

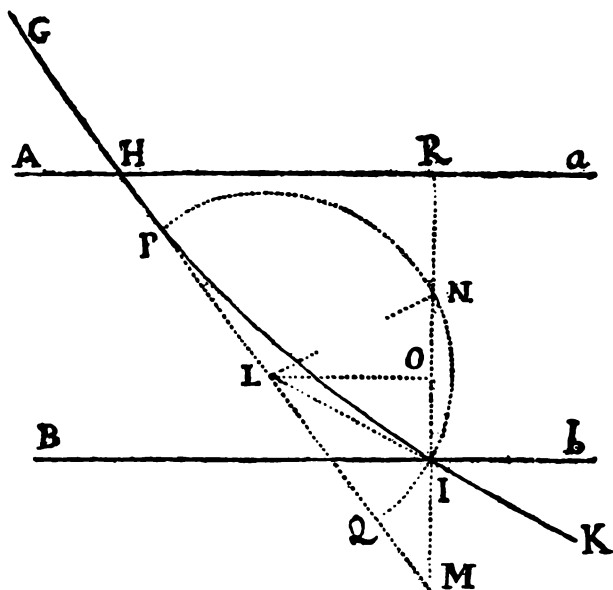



Fig. 21 - Come viene deviato un raggio di luce nel passare da un mezzo ad un altro (dai *Philosophiae naturalis principia mathematica* di Newton, Londra 1687).

La natura del colore va acquistando, nelle mani di Newton, una realtà quasi tangibile, sperimentale, che deve aver commosso sia l'autore, sia i suoi contemporanei [6].

[6] Queste dichiarazioni del Newton e anche alcuni degli esperimenti descritti in seguito dimostrano che non solo egli, ma anche i componenti della Royal Society a cui queste « scoperte » furono comunicate ignoravano del tutto la *Thaumantia Liber* di Marcus Marci de Kronland di cui si è riferito il contenuto nelle pagine precedenti. Che il Newton non lo conoscesse è assai spiegabile, perché è stata consuetudine di tutti i giovani di tutti i tempi (e ne avremo ulteriori dimostrazioni anche nelle pagine seguenti) di non curarsi troppo dell'opera dei predecessori, formando la propria informazione storica soltanto sulle opere di compilazione o di grande fama. Meno spiegabile è il fatto che l'opera del Marci non fosse conosciuta dai componenti l'alto consesso della Royal Society. È vera-

Egli dimostra che ogni luce in generale è composta; la scompone col prisma e ne ricava le luci componenti omogenee; con dei

mente notevole il fatto che nessuno abbia rivendicato la priorità del Marci a proposito di non poche affermazioni che hanno contribuito in modo determinante alla affermazione immediata della fama del giovane scienziato inglese. E ciò anche fuori dell'ambito dell'ambiente scientifico inglese.

A questo proposito è stata fatta qualche ricerca, come si è già accennato, in questi ultimi tempi, ricorrendo appunto il terzo centenario della morte del Marci. È risultato che il Marci è stato in relazione con la Royal Society, fino al punto che questa incaricò un suo corrispondente, in viaggio sul continente europeo, di visitare lo scienziato di Praga; si sa che la visita fu fatta, ma quando l'inviato giunse a Praga, il Marci era morto.

Il fatto che le idee del Marci non siano state ricordate dal Newton e dagli altri scienziati del tempo sta a dimostrare che la *Thaumantia* era stata completamente dimenticata. Ciò trova una giustificazione nelle difficoltà che la guerra dei Trent'anni pose alle comunicazioni e agli scambi culturali fra le varie parti dell'Europa; e anche nel fatto, che appunto per questo è stato messo in evidenza, l'opera del Marci era di tipo tradizionale, e ciò in un secolo come il XVII in cui le idee si evolvevano con velocità quasi paragonabile a quella odierna, i libri invecchiavano molto rapidamente, e perdevano subito interesse. Ora, opere ben più importanti di quella del Marci, come ad esempio quelle del Keplero, subirono la stessa sorte e poco dopo anche il *De Lumine* di padre Grimaldi li seguì sotto la coltre dell'oblio. A questo processo non fu certamente estranea la grande autorità che il Newton acquistò con estrema rapidità nell'ambiente scientifico mondiale; ciò portò inevitabilmente a concentrare sulle sue opere l'interesse e l'attenzione degli uomini di scienza, stornandola completamente dalle opere degli altri.

D'altra parte, anche se oggi, dopo la riesumazione della *Thaumantia* del Marci, la scoperta della corrispondenza biunivoca tra rifrangibilità e colore non deve più esser considerata una benemerenza newtoniana, come pure non si deve più attribuire al Newton la gloria dell'esperimento dimostrativo che il lume monocromatico non viene ulteriormente disperso in successive rifrazioni attraverso prismi, è un fatto però incontestabile (almeno per ora) che mentre il Marci descrisse tali fenomeni attribuendoli a teorie medioevali del colore, il Newton invece le inquadrò scientificamente nella sua teoria che spiegava la rifrazione come effetto dell'attrazione materiale fra corpo materiale rifrangente e corpuscoli materiali di lume. Anche se questa teoria poi è caduta, ha servito, nel corso della evoluzione delle idee in questo campo, a dare una spiegazione meccanicistica dei fenomeni luminosi, spiegazione di importanza filosofica indiscutibile in quella fase di evoluzione del pensiero scientifico in generale.

Non era certo il caso di andare a verificare la corrispondenza fra le espressioni dell'edizione esaminata, e quelle delle altre edizioni, tanto più che l'edizione del 1740 è curatissima e in veste tipografica addirittura di lusso, su carta a mano. Però recentemente il prof. Roberto Savelli ci ha segnalato quello che egli riteneva un errore di stampa, e le deduzioni da noi ricavatene. In realtà l'errore di stampa c'è, ma non nel nostro volume; è nella edizione di Losanna. Per altro le deduzioni che ne abbiamo tratto non mutano sostanzialmente perché l'*inflessione* ideata dal Newton non è che una riflessione un po' particolare. Come è stato rilevato a proposito della fig. 21, il Newton non considerava la riflessione come l'effetto dell'urto elastico dei corpuscoli di lume sulla superficie (per modo di dire, perché a livello di quella finezza si sente la struttura corpuscolare della materia, e quindi la superficie non esiste) del corpo riflettente, ma

diaframmi isola una di queste, la manda sopra un altro prisma, e non ne viene scomposta! Ecco così iniziato quel procedimento di analisi della luce, che doveva poi sfociare nella moderna spettroscopia.

Newton sa trarre buon partito da questa analisi. Egli con ciò ha realizzato un altro processo di elementarizzazione del tutto paragonabile a quello che aveva servito ad Alhazen per avviarsi alla soluzione del meccanismo della visione, e a padre Grimaldi per scoprire la diffrazione. Questi avevano elementarizzato le dimensioni geometriche del fascio di luce; Newton elementarizzò la struttura interna; ed oggi l'ottica dimostra che i due processi sono paragonabili a quasi tutti gli effetti.

Dopo aver analizzato la luce, dopo averla monocromatizzata, come si dice oggi, egli procede alla sintesi e ricompone la luce bianca e quella cinerea, atta a essere scomposta a sua volta, come quella originale. Dimostra falsa la pretesa di Cartesio che la rifrazione colori la luce soltanto in corrispondenza della linea di separazione con un'ombra; e mette la conclusione in termini netti nella II Proposizione della Seconda Parte del I Libro: « Ogni luce omogenea ha un colore proprio e suo, corrispondente alla sua rifrangibilità; quel colore non può essere cambiato con alcuna riflessione o rifrazione » [7].

Poco dopo può dare la « Definitio » del concetto di colore in maniera inequivocabile e precisa: « Quella luce omogenea, ossia quei raggi che mostrano il colore rosso, o che piuttosto fanno sì che i corpi osservati mostrino il colore rosso, li chiamo *rubrifici* o *rossi*; e quei raggi che fanno sì che i corpi osservati si vedano di colore giallo, verde, azzurro o violetto, li chiamo raggi *gialli, verdi, azzurri* o *violetti* ».

Naturalmente, precisa, quando dirà di vedere dei raggi o luce colorati, si deve intendere per modo di dire, ma non « philosophice et proprie ». Essi non sono colorati, ma in essi « non vi è altro

come una flessione della loro traiettoria del tipo di quella che subiscono nel miraggio. Ora la fig. 22, nella parte superiore dimostra che il Newton fa deviare i corpuscoli di lume proprio come se si riflettessero sull'ostacolo, secondo questa concezione della riflessione; cioè come se essi subissero una repulsione da parte dell'ostacolo stesso, con effetti tanto più marcati quanto più il corpuscolo si avvicina alla superficie materiale. Cosicché, se anche la parola è cambiata, l'idea sostanzialmente rimane.

[7] « Omne lumen homogeneum, colorem habet proprium et suum, refrangibilitati suae correspondentem; isque color nullis reflexionibus aut refractionibus mutari potest » (Newton, *Optice* cit., I Libro, 2ª Parte, II Proposizione).

che una certa attitudine o disposizione » atta a stimolare la sensazione di colore; proprio come il moto di una campana o di una corda ci fa sentire il suono.

Passa poi a classificare i colori e ne enuncia sette: per continuare la tradizione ormai secolare che, come abbiamo visto, aveva puntato su questo numero, ne esclude il bianco e il nero, e li ordina dal rosso all'arancio, al giallo, al verde, all'azzurro, all'indaco e al violetto.

Però, per quanto in questo quadro Newton ci vedesse un assestamento affascinante, sente di non potersi spingere assolutamente a fondo e accenna a una riserva: « quando dico colori, vorrei che si intendessero sempre quei colori che sorgono effettivamente dalla luce. Infatti ce ne sono degli altri che hanno la loro origine in altre cause... » nel sogno, nelle allucinazioni, nell'urto dei globi oculari, « o comprimendo l'angolo esterno dell'occhio, mentre la visuale è diretta altrove, vediamo dei colori che hanno la lunetta della coda del pavone ».

Di fronte a questa circostanza, che i colori si potessero avere anche senza luce, egli non mostra di commuoversi, e semplicemente vi sorvola: « Quando queste cause o altre simili a queste non intervengono, ogni colore corrisponde sempre alla qualità o alle qualità dei raggi di cui la luce è composta ».

Il sorvolare sui punti scabrosi è uno dei « metodi » della scienza e della filosofia. È la tattica di chi abbraccia un'opinione e ne fa una fede. Chi non vuol fare così è condannato a nuotare nel dubbio e nella insoddisfazione: il caso del II Libro del *De Lumine* di padre Grimaldi ce ne offre un esempio caratteristico.

Il sorvolare sui punti scabrosi, però, è una tattica pericolosa, specialmente per un grande maestro; perché la sua scuola lo seguirà a occhi chiusi, e per chi sa quanto tempo l'obbiezione rimarrà sepolta. Il giorno in cui verrà riesumata, sarà un crollo.

E Newton non sorvolò soltanto su questo argomento.

Per quanto egli avesse dichiarato di voler esporre dei risultati sperimentali, indipendentemente da ogni ipotesi sulla natura della luce, tuttavia da ogni frase, si può dire, sprizza fuori l'idea che gli andava maturando nella mente: che la luce fosse costituita da uno sciame di particelle lanciate a grandissima velocità nello spazio, dotate di massa diversa a seconda del colore. Tanto per citare un caso, l'ultima frase riportata « ogni colore corrisponde sempre alla

qualità o alle qualità dei raggi di cui la luce è composta » è traditrice del pensiero dell'autore, quando si ricordi che non si tratta di raggi geometrici, come li intendono i « mathematici », ma di quelle tali porziuncole susseguentisi e contemporanee.

Dunque egli viene a dire, incidentalmente, che la luce è composta di diverse qualità di questi raggi.

E di questo si deve essere andato ancor più convincendo quando trovò nella massa di queste particelle la possibilità di spiegare la rifrazione e nella varietà di massa la varietà di rifrazione, cioè la dispersione (come viene chiamata oggi).

L'argomento è trattato nella XIV Sezione del volume *Philosophiae naturalis principia mathematica*, sotto il titolo: « De motu corporum minimorum, quae viribus centripetis ad singulas magni alicuius corporis partes tendentibus agitantur ». Quivi l'autore dimostra che, ammessa l'attrazione tra il corpuscolo e il corpo grosso, terminato da una superficie piana, naturalmente trasparente per il corpuscolo, questo vi penetra deviando dalla traiettoria rettilinea di prima, e assumendo una nuova traiettoria rettilinea dopo penetrato nel corpo, raccordata alla precedente da un minuscolo arco di curva; e il seno dell'angolo di incidenza sta al seno dell'angolo di rifrazione nel rapporto delle velocità del corpuscolo, dopo e prima di aver attraversato la superficie del corpo grosso.

È il ragionamento di Cartesio; questi l'aveva fatto formalmente; Newton lo spiega con la forza attrattiva del corpo più denso sul corpuscolo costituente la luce. Però questa attrazione al tempo stesso che, aumentando la componente della velocità normale alla superficie di separazione dei mezzi, faceva flettere la traiettoria verso la normale alla superficie stessa nel mezzo più denso, richiedeva anche che in questo mezzo più denso la velocità risultante del moto del corpuscolo fosse accresciuta.

Cartesio aveva giustificato, o creduto di giustificare, la conclusione; padre Grimaldi l'aveva ritenuta assurda « per se stessa, e per il suo solo enunciato ». Newton... ci passa sopra.

Nell'argomento della dispersione poi non si può passar sotto silenzio un altro caso, che è rimasto famoso.

Ritornando a discutere la XV Esperienza del I Libro, Parte I, dell'*Optice*, la bella esperienza dei prismi incrociati, egli nota che lo spettro (come si chiama oggi) risultante è rettilineo. Egli, come si è detto, operò con tutto il fascio solare e pertanto non si poteva

accorgere della piccolissima flessione che lo spettro stesso assume sempre quando si opera con prismi di vetri diversi o di sostanze diverse: flessione rilevabile soltanto con gli strumenti di precisione moderni.

Tuttavia, egli, dimostrando un'abilità sperimentale sopraffina, nota che le cose non vanno proprio come si sarebbe aspettato, e intravede una spiegazione geometrica dell'anomalia sperimentale. A questo punto, e qui è lo strano, egli cambia metodo: abbandona il proposito induttivo-sperimentale con cui era partito, e deduce quello che dovrebbe essere il comportamento dei prismi da una *ipotesi*: « che i corpi rifrangono la luce, agendo sui suoi raggi secondo linee perpendicolari alla superficie di separazione ». Questa è appunto la teoria contenuta nel citato brano dei *Principia*. Egli è talmente convinto di questo, che cioè con questa ipotesi si può dimostrare giusta « accuratissime » la sua teoria dello spettro obliquo, che due pagine dopo, in seguito a una dimostrazione geometrica conclude: « E poiché questa dimostrazione è universale; e in essa non vi ho introdotto né che cosa sia la luce, né per quale forza venga rifratta, né assolutamente nient'altro, salvo questo: che *il corpo rifrangente agisce sui raggi secondo linee perpendicolari alla sua superficie*, la verità di questa proposizione ne risulta certissima ».

Questa sua certezza lo fece desistere dall'estendere le esperienze e lo portò a enunciare una regola che è passata alla storia col nome di « errore di Newton ». Per la nostra storia poi, il caso è anche più interessante, perché quest'errore era necessario alla vita della teoria di Newton sulla struttura della luce.

Egli infatti, operando su poche sostanze (in generale vetro o acqua) e su pochissimi prismi di vetro (parla di uno verdognolo e di uno candido) conclude che la dispersione è proporzionale alla rifrangenza [8]. Questa conclusione restò famosa come l'« errore » di Newton, perché negava la possibilità di acromatizzare le lenti e i prismi; Newton stesso, passando a discutere della costruzione dei cannocchiali acromatici, inventa appunto il suo telescopio a specchio concavo, essendo convinto della impossibilità di eliminare l'aberra-

[8] « Neque vero diversa ipsa, ex qua prismata constarent, materia, quicquam immutabatur ista longitudo (dello spettro, cioè la dispersione). Nam cum vase ex politis, vitri lamellis in formam prismatis, conclusa intus acqua, conglutinatis uterer; similis plane erat experimenti exitus, secundum proportionem refractionis » (Ivi, p. 20).

zione cromatica dai cannocchiali a lenti [9]. Però questo è un lato per così dire tecnico della questione. A noi ora interessa il lato teorico. Infatti, ammesso che la luce sia composta di particelle materiali di massa diversa a seconda del colore, la deviazione loro doveva esser funzione della sola massa delle particelle stesse, e la massa del corpo attraente vi doveva entrare solo per un fattore fisso, caso per caso. Cosicché la costanza del rapporto tra rifrangenza e dispersione era una necessità per la teoria della luce corpuscolare. Era il caso di chiedere all'esperienza la conferma; e questa l'avrebbe negata. Newton invece ha rinunziato a porre la domanda.

E ciò è veramente strano, quando si pensi che egli compie delle vere acrobazie sperimentali per determinare (nella VII Proposizione) il valore di questo rapporto tra rifrangenza e dispersione; perché coi mezzi di cui egli disponeva era cosa molto ardua. Trovò 27,5 in un caso e concluse che in tutti i casi sarebbe stato sempre tale; quindi nei cannocchiali l'aberrazione cromatica soverchierà sempre quella sferica, finché non si ricorrerà ai telescopi per riflessione.

Concludendo, possiamo riassumere così questa prima parte dell'opera di Newton: progresso sperimentale definito e magnifico. I colori definitivamente strappati alla filosofia del vecchio stampo, oggettivati, definiti, misurati, ordinati, analizzati, sintetizzati; teoretizzati col modello della luce corpuscolare, gravitazionale, attribuendo massa diversa ai diversi colori.

Il progresso sarebbe stato meraviglioso, se non avesse lasciato alle spalle due posizioni pericolosissime: la maggior velocità della luce nei mezzi più densi; la proporzionalità fra rifrangenza e dispersione. Un dubbio ancor più pericoloso pendeva come una spada di Damocle sulla teoria: i colori non generati dalla luce che cosa sono?

Però non dovevano finir qui i dispiaceri per Newton; ben più gravi minacce si stavano addensando contro l'ipotesi corpuscolare, quando si accingeva a spiegare i colori delle lamine sottili e la diffrazione.

Nel II Libro dell'*Optice*, egli riprende le esperienze di Hooke sulla colorazione delle lamine sottili e vi ricama un'altra serie magistrale di esperienze, con misure di una precisione e d'un interesse tutto speciale. Egli ebbe due idee felicissime: una, conseguenza

[9] « Quandoquidem igitur refractionibus perficere conspicilla tubulata, quae sint datarum longitudinum, in negotiis desperatis est; escogitavi quondam telescopium, quod res objectas reflexione inspiciendas exhiberet: utebat autem, loco vitri objectivi, metallo concavo » (Ivi, p. 73).

diretta delle ricerche precedenti, consistette nell'eseguire le esperienze in luce bianca e in luce monocromatizzata col prisma; l'altra fu di utilizzare la forma sferica delle superficie a contatto per misurare lo spessore di quello straterello tenuissimo in cui si formano le colorazioni; straterello, il cui spessore, come si è già ricordato, Hooke aveva dichiarato essere l'elemento fondamentale per ottenere le varie colorazioni, ma che aveva ammesso in via ipotetica, non essendo riuscito con nessun mezzo diretto a rilevarne la presenza e tanto meno a misurarne gli elementi.

Perché Hooke voleva misurare questo spessore direttamente col microscopio; Newton invece mise a contatto una superficie sferica e una piana e dal raggio della prima dedusse la forma dell'interstizio d'aria compreso fra le due. Notoriamente in queste condizioni si formano degli anelli concentrici, col centro nel punto di contatto, nel quale, quando si osservi per riflessione, dalla stessa parte da cui la luce arriva sulla lamina, ogni luminosità scompare, sia in luce bianca, sia in luce monocromatica. I raggi degli anelli crescono come la radice quadrata del loro numero d'ordine, e i raggi stessi degli anelli di uno stesso numero d'ordine crescono al variare del colore della luce, passando dal violetto al rosso.

Newton trovò tutte queste leggi e rimase colpito dal fatto che mentre in luce bianca si vedono soltanto otto o nove anelli, in luce monocromatica se ne vedono diecine e diecine; ma più ancora dall'esperienza fatta guardando attraverso un prisma gli anelli ottenuti con la luce bianca: senza prisma erano i soliti otto o nove anelli; attraverso il prisma apparivano tutti i sistemi di anelli di vario colore, spostati uno rispetto all'altro, e ciascun sistema appariva composto di numerosissimi anelli, come se fosse stato ottenuto con la luce colorata isolata: « ... cosicché ne potevo contare più di quaranta, oltre moltissimi altri così sottili e fitti, che l'acutezza degli occhi non li poteva vedere distinti né contare; ma dallo spazio che tutti occupavano contemporaneamente, giudicai che erano un po' più di cento » [10]

Questa esperienza, « la più meravigliosa fra tutte » [11], dimostra alla mente di Newton che nella lamina sottile sono sempre presenti indipendentemente gli uni dagli altri tutti i diversi sistemi di anelli

[10] Newton, *Optice* cit., p. 166.

[11] « Inter omnes observationes supra memoratas, nulla est quae tam mira habeat adjuncta, quam 24ª » (Ivi, p. 179).

Fig. 22 - Tavola della citata edizione dell'*Optice* di Newton, in cui sono rappresentati gli « anelli » e la loro spiegazione.

dei vari colori, quando si manda la luce bianca; ma a causa delle loro diverse dimensioni, la confusione che ne segue lascia vedere soltanto gli anelli più grossi e più vicini al centro, che è comune a tutti. Conclusione in ottimo accordo col modello della luce che risultava dalle esperienze coi prismi.

Il guaio serio stava nel render conto della formazione degli anelli

in luce monocromatica. Le misure e i calcoli relativi portano Newton a constatare che gli anelli scuri si formavano sempre dove lo spessore della lamina era multiplo di un dato valore (1/89000 di « uncia », ossia 0,285 micron, per la luce gialla viva) e gli anelli chiari dove lo spessore aveva valori intermedi tra quelli degli anelli scuri precedente e seguente. Trovò poi che lo spessore necessario per dare gli anelli rossi stava a quello dei corrispondenti anelli violacei come 14 a 9.

Di fronte a queste risultanze sperimentali, non si poteva negare una periodicità nel comportamento della luce: periodicità caratteristica di ogni singolo colore!

Altra circostanza notevole: gli anelli appaiono anche se invece di guardare la lamina dalla parte stessa da cui vi arriva la luce (per riflessione), la si guarda dalla parte opposta (per trasparenza) e questi sono complementari degli altri, in quanto hanno il centro chiaro e gli anelli chiari occupano il posto che nella osservazione per riflessione occupavano gli anelli scuri.

Newton rappresenta bene il fenomeno in un disegno del suo volume, nel quale disegno per altro è già utilizzata per la rappresentazione la teoria che se ne era foggiato. Egli collega questo fenomeno con quello che aveva dato tanto filo da torcere a padre Grimaldi, cioè della riflessione su entrambe le facce di una lamina trasparente; lo collega con quello della riflessione da parte dei corpi colorati, e anche con quello della rifrazione. Ne risultò una inquadratura più avvincente che convincente, che apparve come una meraviglia ai suoi ammiratori; però tutto sommato quello che ne appare meno soddisfatto sembra proprio Newton.

L'ossatura della teoria escogitata è contenuta proprio in quella frase appena avvertibile, che al lettore frettoloso può sembrare una semplice pedanteria formale, contenuta nella III Definizione: « ... E sono raggi più o meno riflessibili quelli che sono riflessi più facilmente o più difficilmente » [12].

[12] « ... Radii autem in aëre existentes (uti dudum *Grimaldus*, luce per foramen in tenebrosum cubiculum admissa, invenit, et ipsequoque expertus sum) in transitu suo prope corporum vel opacorum vel perspicuorum angulos (quales fiunt nummorum ex auro, argento et aere cusorum termini rectanguli circulares, et cultrorum, lapidum aut fractorum vitrorum acies) incurvantur circum corpora, quasi attracti in eadem; et ex hiis radiis, qui in transitu illo propius accedunt ad corpora incurvantur magis, quasi magis attracti, ut ipse etiam diligenter observavi. Et qui transeunt ad maiores distantias minus incurvantur; et ad distantias adhuc maiores incurvantur aliquantulum ad partes contrarias, et tres colo-

Si tenga presente la definizione di *raggio* data da Newton: una porziuncola di luce per parlare in generale, come egli tentò di fare; ma se vogliamo seguire più facilmente il modello su cui foggiava la sua fraseologia, possiamo dire senz'altro: un corpuscolo.

Con questo la frase citata della III Definizione non può essere un accenno a quello che oggi si chiama « il coefficente di riflessione » delle varie sostanze, come sembrerebbe a prima vista, ma rappresenta un concetto profondamente diverso: in primo luogo perché *sono i raggi* più o meno riflessibili, cioè questa proprietà selettiva è postulata nei raggi senza alcun accenno al corpo riflettente; in secondo luogo perché qui non si parla di un effetto statistico, per cui nella riflessione sopra una superficie una percentuale maggiore o minore dei corpuscoli entrano nel corpo o lo evitano tornando indietro; ma si parla proprio di una proprietà o « dispositio », come dice precisamente l'autore, per cui certi raggi (corpuscoli) si riflettono meglio e certi altri si riflettono peggio, a parità assoluta di condizioni esterne a loro. E questi ultimi, che si riflettono peggio, saranno quelli che penetrano meglio dentro il corpo limitato dalla superficie riflettente.

Questa « dispositio » per altro si trova non completamente d'accordo col meccanismo della riflessione sul quale Newton dapprima insiste recisamente. Egli premette che la materia va considerata molto vuota: composta di molto spazio e di pochi granelli materiali, riprendendo a questo proposito il secondo modello cartesiano, ma ispirandolo di vita nuova: le particelle materiali sono lontane una dall'altra. Dimostra questo con argomenti non molto più estesi di quelli che avevano servito a padre Grimaldi a dimostrare la « porosità » della sua materia.

Pertanto, su una materia così rarefatta i raggi luminosi (corpuscoli) dovevano riflettersi per ragioni diverse dall'urto diretto materiale [13]. Le ragioni precise sono specificate dall'autore:

rum fascias efformant. [Segue la spiegazione della figura riportata nella fig. 25]... Fit igitur refractio [in nota è aggiunto: " Fit igitur refractio et reflexio "], non in puncto incidentiae, sed paulatim per continuam incurvationem radiorum factam partim in aëreantequam attingunt vitrum, partim (ni fallor) in vitro, postquad illud ingressi sunt;... ».

Dalla nota inserita in questo testo, si dovrebbe dedurre che l'*errore* introdotto nel titolo primo del Libro Terzo dell'*Optice*, edizione di Losanna 1740, è piuttosto una interpretazione.

[13] « Reflexionis causa non est attribuenda impactioni luminis in partes corporum solidas sive impervias; quomodo usque antehac creditum fuit » (p. 202).

1) perché la riflessione avviene ugualmente sulle due facce di una lamina di vetro immersa nell'aria e avviene peggio se dopo il vetro c'è l'acqua (padre Grimaldi ci s'era stillato parecchio il cervello di fronte a questo mistero!);

2) perché nella riflessione totale non passa nulla, mentre per un angolo d'incidenza un pochino inferiore di quello limite (per usare termini moderni) passa ancora molta luce;

3) perché, mandando lo spettro, ottenuto con un prisma, entro un altro prisma, si può regolare l'angolo d'incidenza in modo da avere contemporaneamente la riflessione totale dei raggi violetti e la trasmissione di quelli rossi;

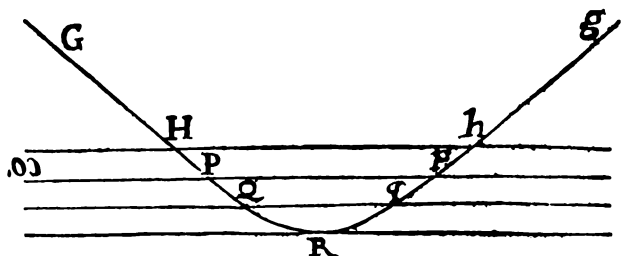



Fig. 23 - Il meccanismo della riflessione secondo Newton. Dalla citata edizione dei *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

4) perché, se due lamine di vetro si portano a contatto intimo (oggi detto *contatto ottico*), la riflessione è completamente nulla nella regione di contatto;

5) perché nelle bolle di sapone in alto si forma la « macchia nera » in cui non si riflette nulla, mentre subito intorno si ha una riflessione considerevole;

6) perché al crescere dello spessore delle lamine sottili si hanno alternativamente zone con riflessione e zone senza riflessione;

7) infine, perché la riflessione avviene secondo direzioni ben precise e definite sulle superficie lucidate, che pure sono piene di graffi sottilissimi, dovuti proprio al modo in cui si esegue la lucidatura.

Ce n'è veramente abbastanza per dover escludere la riflessione per urto elastico diretto dei corpuscoli di lume contro la materia.

Il meccanismo che Newton sostituisce a quello demolito si trova

dimostrato nella Proposizione XCVI, Theorema L dei *Principia* e si trova pure riportato nell'*Optice* [14]. « Se la luce è più veloce nei corpi che nel vuoto; in quella proporzione in cui stanno i seni che misurano la rifrangenza dei corpi; questi eserciteranno forze per riflettere e per rifrangere la luce, molto prossimamente proporzionali alla densità dei corpi stessi; fatta eccezione dei corpi grassi e solforosi; che rifrangono di più degli altri corpi della stessa densità ».

Ecco dunque la spiegazione: i corpi attraggono i raggi luminosi corpuscolari: in certe condizioni questi vengono fatti penetrare dentro il corpo, e avvicinati o allontanati alla normale alla superficie delimitante, a seconda che la velocità nel corpo è maggiore o minore, rispettivamente, che fuori; in certe altre condizioni si ha una flessione della traiettoria, come oggi si dice che avviene nel « miraggio » e si ha riflessione. Se tutte le particelle sono in condizioni meccaniche da doversi riflettere, si ha la riflessione totale.

Il discorso, nella sua semplicità meccanica, è suggestivo; ma delle nubi minacciose appaiono all'orizzonte: perché i corpi grassi e solforosi si comportano più energicamente?

L'obbiezione era grave per chi tendeva a dimostrare che anche questa riflessione e questa rifrazione rientravano nel quadro dei fenomeni dovuti all'attrazione universale. Newton tenta di superare la difficoltà: « Come la luce concentrata da un vetro ustorio, agisce energicamente sui corpi solforosi, fino a trasformarli in fuoco e in fiamma; così, poiché ogni azione è reciproca, i corpi solforosi debbono agire energicamente sui raggi della luce » [15]. E a riprova di questa reciprocità di azione tra luce e materia aggiunge che i corpi più rifrangenti, esposti al Sole, si riscaldano di più di quelli meno rifrangenti. Però non cita esempi e passa oltre. Il testo dà l'impressione che l'autore preferisca scivolare sull'argomento.

Un'altra nube ben più minacciosa oscurava l'orizzonte: perché una volta esclusa l'azione globale del corpo sulla particella di lume, questa certe volte si riflette e certe altre, in condizioni meccaniche identiche, si rifrange?

Il caso non ammetteva che una soluzione: dal momento che le condizioni ambientali ed esterne alle due particelle, di cui una si rifrange e una si riflette, erano identiche, non si poteva fare appello a nessuna azione esterna: non restava che postulare una « di-

[14] Newton, *Optice* cit., Libro II, Parte III, Proposizione X, p. 209.
[15] Ivi, p. 214.

spositio » della particella stessa: quelle che vogliono, passano; quelle che non vogliono, non passano. E allora che valore veniva ad avere tutta la costruzione meccanica?

Però Newton dimostra una grande abilità nel presentare questa rinuncia come una vittoria. Appoggiandosi alle esperienze e alle misure sugli « anelli », mette le cose in modo che questa « dispositio » diventa quasi una legge, una scoperta, che espone nella XII Proposizione: « Ogni raggio di luce, nell'attraversare una qualunque superficie rifrangente, acquista una certa costituzione o disposizione transitoria, che nell'avanzarsi del raggio si inverte a intervalli uguali, e fa sì che nei singoli accessi di questa disposizione, sia trasmesso più facilmente attraverso la prima superficie rifrangente subito dopo incontrata; invece nei singoli intermezzi o intervalli dello stesso raggio sia riflesso più facilmente dalla superficie suddetta » [16].

Di qui trae facilmente la ragione degli « anelli », e arriva alla definizione: « Chiamo *vices facilioris reflexionis* gli accessi o variazioni di disposizione per cui un raggio si riflette più facilmente; chiamo invece *vices facilioris transmissionis* le variazioni di disposizione per cui il raggio stesso viene trasmesso più facilmente. E lo spazio che intercede fra le variazioni di uno stesso accesso, lo chiamo *intervallum vicium* » [17].

Però Newton non è più padrone della situazione: postula questa attitudine dei corpuscoli a riflettersi meglio o a penetrar meglio, e postula anche la variazione periodica a intervalli regolari col pretesto che con questo rende ragione bene della formazione degli « anelli », tanto è vero che fa nascere questa disposizione transitoria nel momento della rifrazione attraverso la superficie d'entrata della lamina sottile; e poi la fa cessare dopo aver attraversato la superficie d'uscita. Ma tre pagine dopo allarga il campo d'azione di questa « dispositio » per render ragione del semplicissimo e pur tanto scabroso fenomeno della riflessione parziale sulle due facce di una lamina trasparente qualunque; infatti la XIII Proposizione suona così: « La causa per cui le superficie di tutti i corpi spessi trasparenti riflettono parte della luce incidente su di esse, e parte la rifrangono, è questa: che alcuni dei raggi nel momento in cui incidono sono nell'accesso di miglior riflessione, altri invece nell'accesso di miglior trasmissione ». E aggiunge: ...È verisimilis-

[16] Ivi, p. 216.
[17] Ivi, p. 219.

simo che la luce acquisti questi accessi al momento in cui è emessa dai corpi luminosi; e che li mantenga in tutto il suo cammino ».

In tutte queste pagine si sente il ripiego, l'insufficienza, l'insoddisfazione dello stesso autore. Se egli fosse stato schietto, avrebbe dovuto limitarsi a dire: gli anelli impongono una periodicità; esiste la riflessione parziale della luce sulle superfici trasparenti; questo dice l'esperienza, ma la teoria corpuscolare non può spiegare tutto ciò con azioni ragionevoli tra la materia e i corpuscoli di lume. Invece egli volle tentare un primo passo verso la teoria: quello del battesimo del fenomeno e di alcuni suoi elementi; così definì le « vices » e l'« intervallum vicium ».

Segue una pagina drammatica:

> Però questa azione o disposizione, quale finalmente sia: se consista in un qualche moto rotatorio [18] o vibratorio [19] del raggio stesso, o anche del mezzo, o se dipenda da qualche altra causa, io qui non indago. Coloro che non si possono indurre ad accogliere niente di nuovo e di trovato di recente, se non lo possono subito spiegare con qualche ipotesi, potranno intanto farsi anche questa rappresentazione: come le pietre che colpiscono l'acqua, vi eccitano un certo moto ondoso; e tutti i corpi, percossi, mandano delle vibrazioni nell'aria; così i raggi di luce, urtando contro qualunque superficie rifrangente o riflettente, possono eccitare delle vibrazioni nel mezzo o nella sostanza rifrangente o riflettente; e eccitando queste, agitare le parti solide del corpo rifrangente o riflettente; e con ciò far sì che il corpo in certo qual modo si riscaldi; quindi le vibrazioni si propaghino nel mezzo o sostanza rifrangente o riflettente, circa allo stesso modo come le vibrazioni che daranno il suono si propagano nell'aria; e si muovano più velocemente dei raggi stessi, in modo da precederli; e quando un certo raggio sia in quella parte della vibrazione che cospira col suo moto, esso facilmente attraverserà una superficie rifrangente; quando invece sarà in una parte contraria della vibrazione, che cioè ne osteggi il moto, allora esso si rifletterà facilmente; e di conseguenza ogni qualunque raggio così è atto, essendo preceduto dalle singole vibrazioni, a essere riflesso più facilmente o a essere trasmesso più facilmente, alternativamente. Ma, se questa ipotesi sia vera o no, dico, qui non indago. Ne avrò abbastanza di aver trovato che i raggi sono atti per qualche causa a essere riflessi più facilmente o a essere rifratti più facilmente, alternativamente, per molte volte [20].

[18] Evidente accenno alla teoria di Cartesio sui colori.
[19] Accenno pure alla teoria dei colori di padre Grimaldi.
[20] Newton, *Optice* cit., p. 218.

Newton aveva perso la sua battaglia. Egli stesso aveva affilato il coltello che doveva uccidere la sua creatura.

Come a padre Grimaldi capitò proprio il caso di scoprire la diffrazione, mentre andava cercando la sua luce materiale, così a Newton capitò proprio di studiare le leggi dell'interferenza, mentre stava inquadrando i suoi corpuscoli nel quadro grandioso dell'attrazione universale. Certo a entrambi la sorte non poteva giocare scherzo più maligno.

Newton doveva avere la sensazione della situazione, ma non si voleva arrendere. In queste pagine si notano tante incongruenze che non sono da pari suo. Per esempio, a poche pagine di distanza, espone la XIII Proposizione, che non va d'accordo con la XII, e che al tempo stesso si esponeva ad una critica immediata che non poteva sfuggire. Se la riflessione parziale sulle superficie trasparenti ha luogo in seguito alla presenza nei raggi luminosi delle « vices » di miglior riflessione o di miglior trasmissione, perché non si riflette il 50% della luce incidente? E perché la disposizione alla riflessione varia con l'incidenza?

È impossibile che Newton non si sia fatto questa domanda; ma egli sapeva che la risposta sarebbe stata fatale per la sua teoria. E c'è passato sopra. Con questo stato d'animo ha affrontato la terza parte del suo lavoro, andando a infrangersi decisamente contro gli scogli più duri: la diffrazione e la doppia rifrazione.

Il terzo Libro dell'*Optice*, francamente, non è all'altezza degli altri due. *Oggi*, con la conoscenza raffinata che si ha dei fenomeni di diffrazione, si può criticare facilmente il contenuto dal punto di vista sperimentale e da quello razionale. Mentre ci si deve levare tanto di cappello al modo, al metodo e all'acume con cui sono condotte le esperienze sui colori prismatici e sugli anelli, anche se nella inquadratura teorica si può segnalare qualche particolare di una certa importanza su cui si direbbe che l'autore ha voluto sorvolare; quando invece si sottopone ad un esame critico il piccolo gruppo di esperienze di diffrazione, balza agli occhi un « partito preso » che non ha lasciato libero lo sguardo allo sperimentatore.

Il primissimo titolo del Libro III: « Osservazioni circa le inflessioni [21] dei raggi di luce, e i colori da ciò generati », dimostra subito

[21] A proposito di questa parola, si deve segnalare un caso strano. Dell'*Optice* ne sono state fatte numerose edizioni a partire dalla prima del 1704

le intenzioni dell'autore. Le « inflessioni » a cui allude sono proprio i fenomeni di diffrazione: egli ci vuol vedere un effetto del tipo di quello della riflessione, e non vuol neppure citare il nome del fenomeno proposto da padre Grimaldi (*diffrazione*), perché non vuole neppure in via polemica accennare all'idea di costui che vi siano quattro modi di propagarsi della luce: direttamente, per riflessione, per rifrazione e per diffrazione. Veramente nel frontespizio dell'opera l'autore parla di « de reflexionibus, refractionibus, inflexionibus et coloribus lucis » quasi per indicare che le inflessioni erano qualche cosa di diverso dalle riflessioni; ma in sostanza, dato che l'autore stesso non si è fatto premura di dare una definizione esplicita del significato del termine « inflessione », si deve dedurne che si tratta di un fenomeno affine alla riflessione, ma non vincolato dalla ferrea legge della uguaglianza degli angoli di incidenza e di riflessione. Se egli avesse ammesso che esisteva un quarto modo di propagazione, degno di esser chiamato diffrazione, avrebbe dovuto trovare nel suo modello di luce un altro attributo di natura meccanica per renderne ragione. E siccome il suo modello si rifiutava recisamente, egli è portato a tentare di far rientrare la diffrazione nel gruppo dei fenomeni di riflessione e di rifrazione già noti; e indirizza le esperienze in questo senso.

Però, nonostante tutta la buona volontà, le esperienze non lo hanno assecondato quel tanto che bastava per accontentarlo.

Newton ripete le esperienze di padre Grimaldi, le completa e le amplia, arricchendole di misure. Le esegue in luce bianca e anche in luce monocromatizzata con un prisma: osserva i fenomeni di diffrazione dietro una fessura di larghezza regolabile, e infine compie la elegante esperienza dietro una fessura a orli inclinati fra loro, cioè a forma di angolo. Nella figura 3 della Tav. I del Libro citato sono riprodotti bene i fenomeni, tra cui caratteristiche le frange iperboliche, in corrispondenza della parte più acuminata della fessura.

Tra le misure più interessanti per il nostro scopo vanno notate quelle dell'interdistanza delle frange di diffrazione al variare della distanza fra l'ostacolo diffrangente e il piano di osservazione; mi-

in inglese e la prima latina del 1706, e in tutte, almeno in quelle che ci è stato possibile consultare, a questo punto è scritto: inflessioni. Tranne che nell'edizione di Losanna del 1740, nella quale è scritto: riflessioni. Siccome quando abbiamo analizzato per la prima volta questa opera, abbiamo avuto fra mano l'edizione di Losanna del 1740, ne abbiamo tratto le conclusioni che sono state esposte nelle edizioni precedenti di questa storia.

sure che, eseguite con la consueta perizia, dimostrano che le frange stesse non appartengono a dei piani tangenti all'ostacolo, ma a superficie curve; come del resto padre Grimaldi aveva già trovato. E questo deve essere stato per Newton fonte di serie preoccupazioni.

Altra osservazione degna di nota è quella della striscia nera che si forma nel mezzo del fascio dopo che ha oltrepassato una fessura,

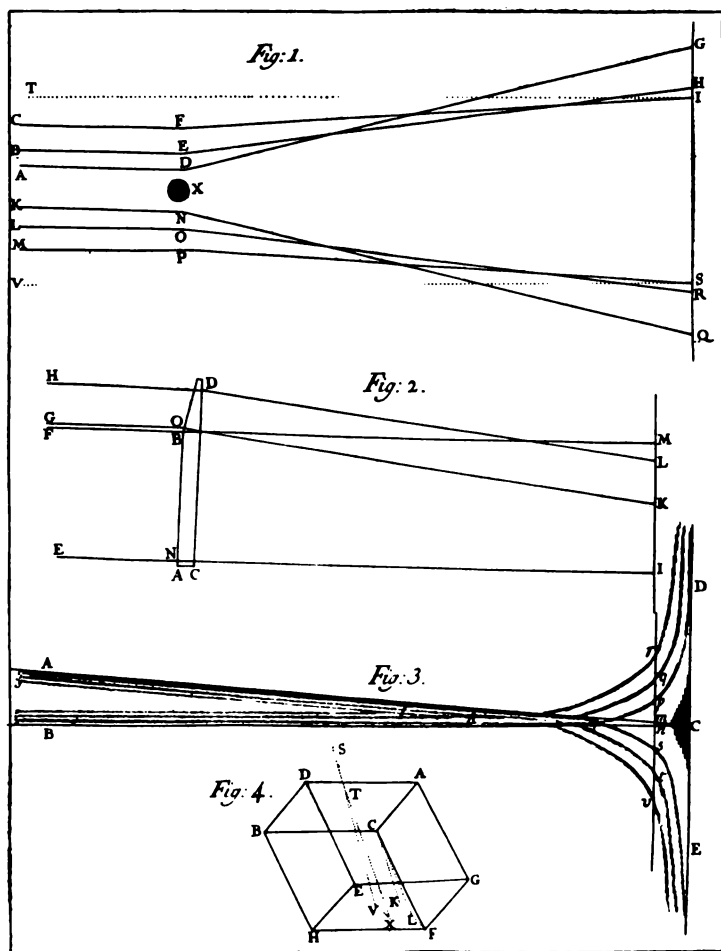



Fig. 24 Tavola della citata edizione dell'*Optice* di Newton, ove sono schematizzate le esperienze di diffrazione e la loro spiegazione per « riflessione » e per « rifrazione ».

a distanza opportuna, in funzione della larghezza della fessura stessa. Newton questa striscia nera l'ha notata e ha anche notato che scompare e riappare variando la larghezza della fessura e tenendo fisso lo schermo su cui si osserva, oppure tenendo fissa la larghezza della fessura e avvicinando o allontanando lo schermo. Anche questo deve avergli causato delle serie preoccupazioni, perché non entra in troppi particolari; e contrariamente a quanto fa nelle descrizioni delle esperienze dei Libri precedenti, dove espone obbiettivamente e ordinatamente i fenomeni osservati, per poi passare alla inquadratura teorica, qui descrive le esperienze col linguaggio stesso della spiegazione, quasi per indurre il lettore a vederle senz'altro in quella data luce.

Per esempio, nell'Osservazione VI, dopo aver detto di aver collocato due coltelli coi tagli affacciati, in modo da fare una fessura, continua: « quando i fili dei coltelli distavano fra loro di 1/400 di "uncia" (= circa 0,05 mm), il raggio trasmesso fra essi si divise in due parti e lasciò un'ombra fra queste due parti. Tale ombra era talmente nera e tenebrosa che tutta quanta la luce trasmessa tra i coltelli sembrava *inflessa*, e deviata o da una parte o dall'altra » [22].

Queste poche parole ci mostrano già come Newton intendeva spiegare la diffrazione oltre la fessura: gli orli dei coltelli *inflettevano* la luce, come una specie di attrazione o di repulsione, e la dividevano in due fasci; cosicché a una certa distanza dalla fessura sullo schermo di osservazione doveva apparire un filetto nero, parallelo ai labbri della fessura stessa. Egli precisa che i raggi passanti per la parte mediana di questa andavano a formare la parte centrale della figura sullo schermo; ma tace del fatto, assai preoccupante per il modello proposto, che allontanando lo schermo dalla fessura, al posto della linea nera ci veniva piena luce.

Un'altra conclusione era inevitabile, per chi si voleva porre sulla via indicata da Newton: dal momento che le frange di diffrazione non appartengono a un piano, ma a una superficie curva, l'azione di attrazione o di repulsione degli spigoli dell'oggetto diffrangente doveva continuare anche quando i corpuscoli ne erano lontani! E questo era veramente troppo!

Questa diffrazione si presentava proprio maligna: si mandava la luce sopra un capello, e l'ombra era più dilatata di quello che

[22] Newton, *Optice* cit., p. 260.

volesse la geometria; si mandava la luce attraverso una fessura, e il fascio invece di stringersi si allargava. Anche se vogliamo chiudere un occhio dapprincipio sulle frangioline che accompagnano sempre gli orli di questi fasci e ombre, nel primo caso si poteva esser indotti a pensare, come fece Newton, a una specie di riflessione sugli orli dell'ostacolo lambiti dalla luce; ma la stessa regola non poteva valere più nel secondo caso, che portava invece a pensare, come fece Newton, a una *inflessione* in senso contrario alla riflessione di prima.

Il bello stava a mettere insieme d'accordo le due cose; e Newton non lo tenta neppure; ma abbozza un principio di spiegazione, come appare da uno « Scholium » dei *Principia*: la luce raggiunge un corpo a forma di cuneo, come il taglio di un coltello, in parte si *rifrange*, come attraverso un prisma; in parte gira intorno al taglio e dà luogo alla *inflessione*; e in seguito fa uso continuato di questo modello, dimenticandosi di quell'altro accennato per spiegare la dilatazione dell'ombra oscura.

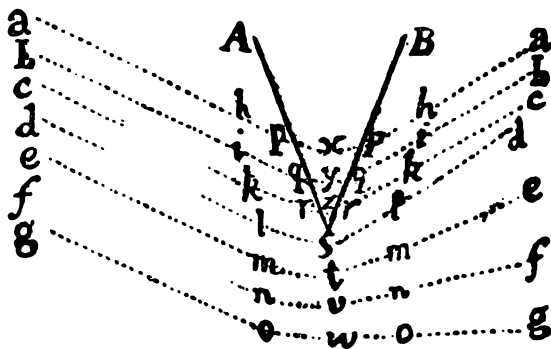



Fig. 25 - Il meccanismo intimo a cui Newton vuol riportare la diffrazione, come è schematizzato nella citata edizione dei *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

Eppure egli conosceva l'opera di padre Grimaldi, tanto è vero che lo cita (naturalmente senza nominare la diffrazione), come lo scopritore del fenomeno; ma si dimentica che questi aveva dimostrato con dovizia di argomenti anche sperimentali, che nella diffrazione si doveva escludere ogni riflessione e ogni rifrazione. Invece Newton si limita a descrivere le esperienze di diffrazione sempre

dietro coltelli e spigoli vivi (« acies ») e cita gli orli circolari delle monete di oro, argento e bronzo, specificando bene i « termini rectanguli circulares », quasi che se la moneta fosse messa di taglio il fenomeno non ci fosse; cita inoltre i tagli dei coltelli, delle pietre e dei vetri rotti [23]: i capelli (fili e aghi) li adopera soltanto quando si tratta di realizzare la *riflessione* che ne allarga l'ombra. Perché non ha guardato la diffrazione dietro una fessura formata da due aghi, anziché da due fili di coltello? Questa esperienza era doverosa, dal momento che altri aveva già constatato che le cose non potevano essere come Newton le voleva far apparire.

Ma egli sapeva di non essere sulla via giusta. In queste pagine l'uomo ha superato lo studioso, e ha fatto il possibile per far intravedere una spiegazione di questi fenomeni bizzarri e sconcertanti. E dopo questo modesto tentativo, si ritira in buon ordine. Termina la descrizione dell'XI Esperienza con queste parole:

Facendo le osservazioni premesse, mi ero prefisso di ripeterne la maggior parte con maggior cura e di aggiungerne alcune altre in più; per esplorare infine in qual modo e con quale legge i raggi di luce si inflettono nel passare vicino agli orli di tutti i corpi, per formare quelle frange con delle linee nere intramezzate. Ma da questi studi allora per caso venni distratto; e ora non mi posso convincere a riprendere questi studi interrotti. Per cui, non avendo assolto questa parte del mio programma, concluderò soltanto proponendo alcuni Quesiti, coi quali altri, in seguito, possano venire indirizzati nel continuare questi studi [24].

Newton affida ad altri il compito di spiegare i fenomeni per cui egli si era dovuto riconoscere incapace.

La forma, innegabilmente, è abile e le conseguenze sono state quelle che, probabilmente, Newton si riprometteva.

[23] Newton, *Principia* cit., ed. 1687, p. 231.

[24] « Cum praemissas observationes facerem, statueram mecum plerasque earum majori cum accuratione iterare, aliisque aliquas de novo insuper adjicere; quo nimirum id exploratum tandem haberemus, quem in modum et qua ratione radii luminis inflectantur inter transeundum prope corporum omnium extrema, ad conficendas fimbrias illas cum lineis suis obscuris interjectis. Verum ab hisce studiis tum forte avocatus sum; et non possum id nunc in animum meum inducere, ut ad studia haec intermissa iterum me referam. Quare, cum hanc instituti mei partem non absolverim; concludam, proponendo solummodo Quaestiones aliquas, quibus alii postea in hac materia ulterius prosequenda dirigi queant » (Newton, *Optice* cit., p. 269).

Egli così riassume in « XXXI Quaestiones » estese in ben 60 pagine, le esperienze e le sue teorie sulla natura della materia e della luce. Particolarmente degna di attenzione è la « Quaestio XXV » dove tratta della *doppia rifrazione*. Per altro, prima di occuparci di quest'altro duro scoglio, contro il quale Newton dovette subire un urto sgradevole, conviene rilevare qualche altra particolarità contenuta nelle « Quaestiones » e non trattata nelle pagine precedenti.

Così sempre a proposito della diffrazione, con tutte le riflessioni e inflessioni, rimaneva sempre incomprensibile perché la luce riflessa da fili sottili o quella inflessa dai tagli di coltello si ostinasse a distribuirsi in frange parallele agli orli e non si propagasse in linea retta. Newton avanza un'idea, ma così timidamente, che la pone soltanto sotto forma di « Quaestio ». Infatti la III di queste dice: « Non forse i raggi di luce nel passare vicino agli orli dei corpi, vengono inflessi rapidamente in qua e in là, con un qualche moto oscillante e sinuoso, a guisa di anguille? E le tre frange di luce colorata sopra ricordate, non forse hanno origine da tre di tali inflessioni? » [25].

Veramente è assai ardita. Ma non è il caso di insistere sulla diffrazione, dal momento che Newton vi aveva rinunciato.

Una nota interessante a proposito della visione è contenuta nelle « Quaestiones » XII e XIII. Newton domanda se non si debba pensare che i corpuscoli di lume, colpendo il fondo dell'occhio, eccitino delle *vibrazioni* nella rètina, e queste, propagandosi lungo il nervo ottico fino al cervello provochino il senso della visione (« sensum videndi »); e aggiunge che raggi di genere diverso dovrebbero eccitare vibrazioni di *grandezza* diversa (« diversa magnitudo ») e in virtù di questa diversa grandezza dovrebbero dar luogo alla sensazione dei diversi colori, come succede per il suono. Precisa subito dopo che le vibrazioni relative ai raggi più rifrangibili (violetti) dovrebbero essere « brevissimas » e quelle relative ai raggi meno rifrangibili (rossi) « longissimas ».

Anche in questo si sente l'influenza dei predecessori, specialmente di padre Grimaldi. Però nelle pagine seguenti Newton precisa le idee in modo diverso; perché, portato a considerare un mezzo molto più sottile ed elastico dell'aria, presente in tutto il vuoto, in tutti i corpi e in tutto l'Universo, e che con le sue *vibrazioni* trasmette il calore, mezzo che egli chiama *etere*, pensa che la tra-

[25] Ivi, p. 270.

smissione dello stimolo luminoso dagli occhi al cervello attraverso il nervo ottico avvenga per mezzo di vibrazioni di questo etere [26].

Veniamo ora alla XXV « Quaestio », dove viene sfiorato l'argomento della doppia rifrazione. Newton riferisce varie esperienze, in parte eseguite da Erasmo Bartolino e da Huyghens, in parte ideate ed eseguite da lui stesso; quando poi si tratta di modellare la spiegazione e di coordinarla con le idee finora difese, si limita a porre delle domande, lasciando la risposta ai posteri che si occuperanno dell'argomento.

Notoriamente l'essenza della doppia rifrazione consiste nel fatto che un fascio di luce anche monocromatica, incidente sulla superficie piana di un cristallo (specialmente di spato d'Islanda, ma anche di quarzo e di tanti altri cristalli, sia pure in forma più modesta), si scompone in due fasci, di cui uno segue le leggi comuni dell'ottica geometrica e viene chiamato *fascio ordinario*, mentre l'altro, che vien chiamato *fascio straordinario*, segue leggi nettamente diverse; tra l'altro, questo fascio straordinario, salvo in qualche circostanza particolare, non rimane neppure nel piano definito dalla normale alla faccia d'incidenza e dal fascio incidente.

Se poi i due fasci così ottenuti all'emergenza di un cristallo di spato d'Islanda si fanno cadere sopra un altro cristallo che dà questi fenomeni, in generale ciascun fascio si scompone in due nuovi, ma di intensità complementare e per certi orientamenti del nuovo cristallo i due fasci, pur rifrangendosi non si sdoppiano più, ma rimangono due soli, e ciò anche se il secondo cristallo si ruota di 90 gradi rispetto alla loro direzione come asse, a partire da una posizione in cui questa condizione è realizzata. Fenomeno certo molto imbarazzante per chi voleva vedere nei fenomeni della riflessione, della rifrazione, della inflessione l'effetto di un'unica azione della materia sui corpuscoli del lume [27]

Newton riteneva di aver fatto una scoperta quando aveva dimostrato che la riflessione non avveniva per urto sulle parti materiali dei corpi solidi, ma in seguito a un effetto d'insieme di tutte queste, in quanto un corpuscolo luminoso era attratto più dalla materia di un mezzo che da quella dell'altro al di là della superficie di separazione riflettente. Ma già la riflessione parziale aveva fatto crollare

[26] Ivi, XXIII Quaestio, e XXIV Quaestio, p. 284.

[27] « ... Et (radii luminis) reflectuntur, refringuntur atque inflectuntur, una eademque vi, varie se in variis circumstantiis exerente (*o* exercente) » (ivi, Quaestio IV, p. 271).

il castello, lasciando per così dire all'arbitrio della particella di lume il riflettersi o il rifrangersi in queste circostanze. Come se questo non bastasse, ora sopraggiunge una nuova complicazione: quando i raggi corpuscolari incontrano la superficie trasparente di una di queste sostanze come lo spato d'Islanda (che oggi si chiamano birifrangenti), in parte si riflettono in un'unica direzione (e questo nessuno lo nota) e in parte si rifrangono, però alcuni secondo una regola, e altri secondo un'altra. Ciascuno dei due gruppi, poi, conserva delle proprietà diverse dall'altro; anzi per così dire quasi complementari e caratterizzate da due piani ortogonali di simmetria passanti per la direzione di propagazione.

Ce n'era abbastanza per confondere completamente le idee!

Newton dovette ammettere l'esistenza di una caratteristica nuova, insita nei corpuscoli stessi, per la quale il cristallo agiva da rivelatore, o meglio da discriminatore. Egli conclude la XXV « Quaestio » dichiarando: « perciò la rifrazione straordinaria dipende da una qualche proprietà congenita dei raggi » [28].

Nella « Quaestio » successiva passa a domandarsi se ciò non possa dipendere dalla forma speciale dei fianchi dei corpuscoli. Per quanto elegante possa sembrare questa ipotesi, non è possibile non vedere che gli effetti di una dissimmetria dei corpuscoli possono derivare soltanto da un contatto, cioè da un urto contro le particelle materiali; ma non si vede come questo si possa accordare con tutta la costruzione precedente. Newton a questo proposito tace, e lancia invece una vaga idea, portando ad esempio dei piccoli magnetini che hanno dei poli o punti privilegiati. Egli fa appello, e giustamente, anche a una dissimmetria nelle particelle costituenti il cristallo birifrangente, ma non entra in particolari sul meccanismo con cui dovrebbe esplicarsi un'azione deviatrice per dare gli effetti strani che si osservano nella doppia rifrazione. Infatti non è facile spiegare il fatto che un fascio di corpuscoli, anche dissimmetrici singolarmente, incidendo normalmente sopra una superficie piana, in parte si riflettono pure normalmente, in parte continuano senza deviare nell'interno del cristallo, ed in parte prendono un'altra direzione nell'interno del cristallo stesso, unica per tutti.

Newton lascia la soluzione di questo rebus ai posteri volenterosi.

[28] « Quare refractio inusitata, pendet ex congenita quadam radiorum proprietate » (ivi, p. 288).

Abbiamo insistito alquanto nel mettere a nudo i punti deboli della costruzione newtoniana perché volevamo giungere ad una conclusione non tanto comune; specialmente, pare, nel secolo decimottavo.

Newton non ha mai voluto asserire alcunché sulla natura della luce in modo reciso. Molti han voluto vedere in ciò un principio filosofico, di colui che non vuol teorizzare, ma vuol prendere la realtà sperimentale come una verità compiuta e per sé stante; un positivismo professato apertamente.

Noi vi vediamo invece uno sforzo immane di giungere ad una costruzione teorica di larghissima portata, seguìto da un fallimento intimo, ma non da una rinuncia aperta. L'autore ha concepito le più rosee speranze durante il primo periodo di brillanti ricerche sperimentali; poi ha dovuto sorvolar più o meno apertamente sopra un secondo gruppo di fenomeni riluttanti all'inquadramento, ed infine ha dovuto rinunciare al suo disegno di fronte ad altri fenomeni irriducibilmente inconciliabili.

Newton lo vedeva, che non era possibile, per la natura stessa delle basi della sua costruzione, di comprendervi tutti i fenomeni ottici conosciuti, anche a costo di sacrifici mentali, di acrobazie teoriche, di rinunzie filosofiche; tuttavia, siccome nella corsa verso il suo miraggio aveva raccolta una larga messe di risultati, ha mantenuto il miraggio stesso perché i suoi successori lo raggiungessero, o, almeno nel corrervi incontro, raccogliessero altri risultati; ma questo lo ha fatto con molta abilità, e non ha mai voluto appunto pronunziarsi recisamente a favore di una teoria sulla costituzione della luce. Questo balza evidente da come è condotta, tecnicamente, la sperimentazione e la descrizione stessa delle esperienze. Chi legga l'*Optice* di Newton senza preconcetti, senza ammirazione sconfinata, ma con spirito critico, sereno, deve concluderne che nessuno poteva lavorare meglio di quello che lui ha fatto, non per costruire, ma per demolire la teoria corpuscolare.

Ed è veramente meraviglioso, diremmo quasi inspiegabile, come una costruzione così sconnessa e barcollante, piena di incongruenze e di lacune abbia avvinto la enorme maggioranza dei fisici del secolo decimottavo e abbia dilagato anche fuori del campo tecnico, come una grande conquista scientifica; fino a far dire a Newton stesso tante cose che egli non avrebbe mai voluto sostenere, perché lui sapeva benissimo che non si potevano sostenere, mentre non c'era chi osasse neppure metterle in dubbio.

Riassumiamole le qualità caratteristiche della « luce » di Newton.

Essa è composta di corpuscoli piccolissimi e velocissimi, detti raggi di luce, propagantisi rettilineamente in qualunque mezzo omogeneo e trasparente, senza risentire alcun disturbo da parte della materia o da parte dei raggi vicini.

I raggi di ugual dimensione sono omogenei e quando colpiscono il fondo dell'occhio vi generano vibrazioni che trasmesse al cervello attraverso l'etere dei nervi, vi stimolano la sensazione di un colore.

I raggi di dimensioni diverse sono causa di colori diversi; i più grossi producono il rosso ed eccitano sul fondo dell'occhio le vibrazioni più lunghe; i più piccoli producono il violetto ed eccitano sul fondo dell'occhio le vibrazioni più corte; quelli intermedi hanno dimensioni intermedie e danno effetti intermedi, secondo la successione dei colori dell'iride.

I raggi hanno forme speciali, con polarità paragonabili a quelle di piccoli magnetini, e con due piani di simmetria ortogonali e passanti per la loro traiettoria.

I raggi hanno velocità diverse nei vari mezzi diafani; la minima velocità la posseggono nel vuoto; e la velocità cresce quanto più cresce la densità del mezzo in cui si muovono; e l'aumento di velocità è maggiore per i raggi violetti che per quelli rossi.

I raggi durante il moto rettilineo di propagazione sono anche dotati di una proprietà oscillante, che potrebbe anche essere dovuta ad un'onda nata insieme col raggio corrispondente, e che si propaga nell'etere (sostanza sottilissima ed elastica, che riempie tutto l'Universo, corpi materiali compresi), precedendo il proprio raggio.

I raggi urtando contro le parti materiali possono essere assorbiti, ma al tempo stesso esse parti si agitano e si riscaldano.

Se poi incontrano una superficie di separazione fra due mezzi possono penetrarvi o non penetrarvi, sia in conseguenza della attrazione che la materia esercita su questi raggi, sia in funzione dell'angolo d'incidenza, sia in conseguenza dello stato attuale (oggi si direbbe « fase ») di quella tale proprietà oscillante già ricordata. La quale in generale è così disposta che i raggi penetrano quasi tutti nell'interno del nuovo corpo e solo per una piccola percentuale (variabile con l'angolo d'incidenza) si riflettono. Quelle eventuali onde precorritrici dovrebbero seguire la sorte stessa del raggio a cui sono associate.

Quando i raggi subiscono una rifrazione, penetrando dentro un nuovo corpo diafano, vengono deviati diversamente in funzione delle

loro dimensioni e pertanto vengono separate le direzioni di propagazione dei corpuscoli di mole diversa, e ciò in relazione soltanto a questa diversità di dimensioni e alle condizioni di incidenza.

Quando questi raggi incontrano dei corpi opachi in parte si riflettono ed in parte ne vengono assorbiti in relazione alle loro dimensioni; e generano così i colori dei corpi.

Quando questi raggi incontrano delle lamine sottilissime, accentuano la loro proprietà in parte riflessiva ed in parte rifrattiva e generano zone di piena riflessione e zone di piena trasmissione in funzione della mole dei raggi stessi e dello spessore delle lamine, essendovi una corrispondenza biunivoca tra la rifrangibilità e la lunghezza degli intervalli di massima riflessibilità.

Quando questi raggi passano vicini a dei capelli, fili, aghi, etc., vi si riflettono sopra, dando ombre più larghe di quelle previste geometricamente; però questa flessione sui piccoli ostacoli è accompagnata da una triplice pulsazione con un certo moto ondulatorio a guisa di anguille; perdono la proprietà di procedere assolutamente in linea retta e si distribuiscono in particolari terne di frange.

Quando questi raggi rasentano lo spigolo di un coltello o affine, vengono incurvati verso il coltello stesso con conseguenze simili a quelle del caso precedente.

Quando questi raggi incontrano la superficie di un cristallo di spato d'Islanda, o di quarzo, o di qualche altra sostanza, in piccola parte si riflettono secondo un'unica direzione come richiede la nota legge della riflessione; gli altri si rifrangono secondo due direzioni generalmente diverse, di cui una segue le leggi della rifrazione ordinaria, e l'altra segue leggi nettamente diverse.

I raggi che hanno attraversato questi cristalli conservano particolari simmetrie e proprietà rispetto a due piani ortogonali fra loro e passanti per la traiettoria della propagazione.

Ecco la più semplice esposizione del modello della « luce », come lo si attribuisce a Newton.

Se in essa si vuol vedere quello che vi è di sostanziale, bisogna riconoscervi la descrizione di una bella serie di esperienze di ottica; una dimostrazione della insufficienza del modello corpuscolare a rappresentare i fenomeni ottici noti; la dimostrazione della necessità di far capo ad un meccanismo ondulatorio.

Nessuno meglio di Newton aveva dimostrato questo.

E invece, mentre Newton sinceramente e abilmente non si era mai voluto pronunciare in modo reciso a favore della teoria cor-

puscolare, prende posizione netta contro la teoria ondulatoria. Strano, ma vero, almeno da quanto lui stesso scrive.

Per quanto egli trovasse continuamente delle difficoltà insormontabili nella teoria corpuscolare, e si trovasse spinto ogni momento verso modelli ondulatori (e nella trasmissione degli stimoli dalla rètina al cervello e nella struttura degli accessi di miglior riflessione o di miglior trasmissione) egli si rifiuta recisamente di accogliere la propagazione per onde nei corpi diafani, perché non riusciva a conciliarvi la propagazione rettilinea. La cosa appare ancora più strana quando si ricordi che, sia pure molto in sordina, egli, costrettovi dai fenomeni di diffrazione, aveva perfino rinunciato alla propagazione rettilinea assoluta dei corpuscoli!

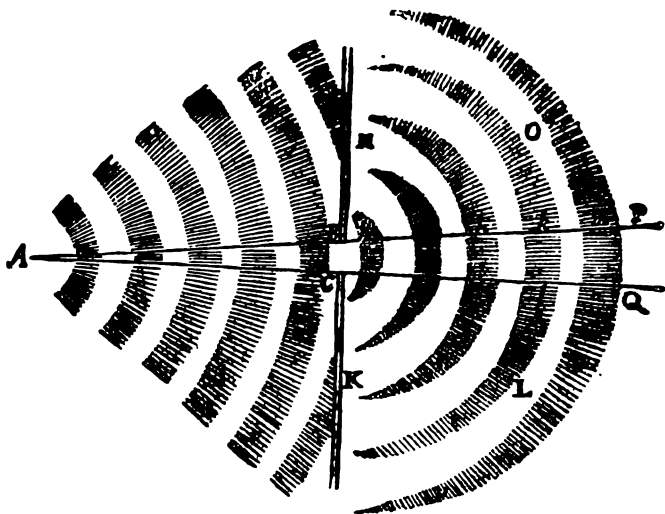



Fig. 26 - La propagazione delle onde dietro un ostacolo forato, come è schematizzata da Newton, nei *Philosophiae naturalis principia mathematica.*

Questa sua avversità alla propagazione per onde appare nella XXVIII « Quaestio », sotto forma di domanda: « Non sono forse errate *tutte* quelle ipotesi, che rappresentano la luce come una certa pressione, o un moto che si propaghi per un mezzo fluido? ».

Ma la dimostrazione è più palese nell'VIII Sezione dei *Principia* dal titolo « De motu per fluida propagato ». In queste pagine Newton

fa degli studi sulla propagazione delle onde in relazione al periodo, alla lunghezza d'onda, alla velocità, alla densità e alla elasticità del mezzo, che a tutt'oggi sono ritenuti giusti e largamente applicati. Ma quale sia il suo intento lo dimostra semplicemente una figura che qui riportiamo: mostrare cioè l'impossibilità delle ombre nelle propagazioni ondulatorie.

La Sezione VIII dei *Principia* termina con uno « Scholium », in cui le conclusioni della Sezione stessa, dedotte nel campo meccanico, vengono estese alla luce ed al suono. Ecco il testo: « Queste proposizioni nuovissime riguardano il moto della luce e dei suoni. La luce infatti, dal momento che si propaga per linee rette, non può consistere in un'azione pura (per le Proposizioni XLI e XLII). I suoni invece... » e della luce non se ne parla più; essa è bell'e liquidata come propagazione ondulatoria.

Le due Proposizioni citate dicono:

Prop. XLI: « Una pressione non si propaga in un fluido secondo linee rette, se non dove le particelle del fluido sono allineate ».

Prop. XLII: « Ogni movimento propagato in un fluido, diverge dalla traiettoria rettilinea verso le regioni immobili ».

Esse sono tanto più interessanti in quanto il volume dei *Principia* è uscito nel 1686, ossia otto anni dopo che Huyghens aveva già compilato e reso assai pubblico (ma non stampato) il testo del suo *Traité de la lumière*. Questo volumetto infatti uscì soltanto nel 1691, ma già nel 1678 era composto e l'autore dice nella prefazione di averne dato lettura a molte persone dell'Accademia di Parigi, tra cui cita i nomi di Cassini, Roemer e De la Hire.

Del resto l'opinione espressa recisamente da Newton circa la propagazione ondulatoria è ribadita nella « XXVIII Quaestio » dell'*Optice*, che è del 1704, ossia posteriore a sua volta di tredici anni all'opera di Huyghens. Anzi in questa sede Newton cita la spiegazione che Huyghens solo aveva tentato della doppia rifrazione sulla base della teoria ondulatoria; ma la cita a conferma della sua tesi, perché riporta la frase originale del testo (ed è l'unica citazione di tutta l'*Optice*) con la quale Huyghens confessa di non saper render conto completamente di sì bizzarro fenomeno.

Non è senza una certa curiosità che si confronta la sorte di Newton con quella di padre Grimaldi. Nell'opera di ciascuno si vede palese il desiderio di dimostrare la natura materiale e corpuscolare della luce; ebbene, tutti e due sono portati dai loro stessi

studi ad ammettere caratteristiche ondulatorie ai loro modelli di luce, ed entrambi lasciano il loro nome legato a fenomeni tipicamente ondulatori: la diffrazione di padre Grimaldi e gli « anelli » di Newton.

A rigor di termini non si sa veramente dove e per merito di chi sia sorta quella teoria corpuscolare che per tutto il secolo decimottavo fu reputata soddisfacente ed anzi gloriosa.

Forse perché la semplicità con cui il modello di Newton rendeva conto dei fenomeni elementari della luce (riflessione e rifrazione) che sono i più comuni e i più noti, nonché della genesi dei colori, deve aver conquistato la enorme maggioranza delle menti facendo restare nell'ombra le pericolose complicazioni della diffrazione e della doppia rifrazione, e confidando con serena aspettativa in un contributo successivo degli studiosi per trovare l'inquadratura anche di questi fenomeni nella teoria così gradita e accessibile.

Se questo poteva avvenire nei cultori modesti e superficiali, dovevano però sorgere menti elette e acute non troppo disposte a prender per buono tutto quello che il pubblico faceva dire a Newton. Tra le prime troviamo appunto quella di Huyghens.

Christian Huyghens, nato a L'Aia nel 1629, aveva 13 anni quando morì Galileo e ne aveva 21 quando morì Cartesio. Di questi grandi maestri e specialmente di Cartesio assimilò la dottrina e i princìpi filosofici nuovi, in fatto di scienza della natura; e indirizzò i suoi studi prevalentemente per una via sperimentale, che in molte manifestazioni si spinge verso il più schietto tecnicismo.

In fatto di speculazione teorica si dichiara molto esigente: basta leggere quello che scrive recisamente nelle prime pagine del suo *Tractatus De Lumine*: « ... o almeno nella vera Filosofia, nella quale le cause di tutti gli effetti naturali si concepiscono per ragioni meccaniche; il che, a mio giudizio, è necessario se non vogliamo respingere ogni speranza di capire qualche cosa in Fisica »[29].

[29] « ..., saltem in vera Philosophia, in qua omnium effectum naturalium causae concipiuntur per rationes mechanicas; id quod meo judicio fieri debet, nisi velimus omnem spem abjicere aliquid in Physicis intelligendi » (Christian Huyghens, *Tractatus De Lumine*, in « Opera Reliqua », a cura di G. J.'s Gravesande, vol. I, Waesberg, Amsterdam 1728, p. 2). La forma latina di questo testo è la traduzione letterale del testo francese; ma in una versione latina,

Di tutta la sua opera vastissima, dedicata a questioni meccaniche e ottiche, solo un breve opuscolo di appena novanta pagine è riservato al problema della natura della luce; e anche questo è stato strascicato per anni e anni e lasciato volutamente incompleto. Nella Prefazione alla prima edizione, che è del 1691, in francese, egli stesso riferisce di aver scritto quel trattato dodici anni prima, quando era in Francia, e di averlo comunicato nel 1678 alla R. Accademia delle Scienze; come abbiamo già accennato sopra, chiama a testimoni Cassini, Roemer e De la Hire. Asserisce di non aver modificato sostanzialmente quello che aveva scritto allora e che solo vi ha aggiunto le idee sulla costituzione dello spato d'Islanda e la scoperta della birifrangenza del quarzo.

Egli stesso risponde alla domanda perché ha differito tanto la pubblicazione, adducendo il fatto di aver scritto il testo in cattivo francese e di volerlo tradurre in latino, di volerlo unire al trattato di ottica strumentale; ma infine ha rinunziato a tutti questi propositi e si è deciso a pubblicare l'opera « com'è » (« qualecumque est »), per evitare che, dilazionando ancora, vada persa. Questo lo scriveva a L'Aia nel 1690, all'età di 61 anni, dopo 12 anni di attesa.

E conclude la breve prefazione auspicando che altri continuino gli studi sull'argomento nell'indirizzo da lui segnato, perché egli è ben lungi dal considerare esaurito il campo di studio: non solo perché certi problemi lui stesso li dichiara ancora insoluti, ma anche perché certi altri li ha lasciati addirittura *intatti*. Infatti non si occupa assolutamente delle sorgenti luminose e dei colori; e quando si dice « assolutamente » non si esagera affatto, perché in tutto il trattato la parola *colore* è usata soltanto in questo brano della prefazione, e, perfino, quando a proposito di argomenti tecnici quali la forma da dare alle lenti per ottenere le immagini più definite, vuol accennare alla aberrazione cromatica (su cui tanto aveva discusso Newton, che voleva vantare il suo telescopio catottrico), per non introdurre parole che alludessero al concetto di colore, colorazione o iridazione ricorre a una perifrasi: perché vi è una certa proprietà nella stessa rifrazione, che impedisce il perfetto incrocio dei

iniziata dallo stesso autore e poi abbandonata dopo poche pagine, la stessa idea è un po' attenuata: satem ijs qui *saniorem* Philosophiam sequi amant, quae causas rerum omnium naturalium mechanicas corporeasque requirit. Quod quidem faciendum existimo, aut in perpetuum omnium in his intelligendi spem dimittendam » (*Oeuvres complètes de Chr. Huyghens*, Martinus Nijhoff, La Haye 1937, p. 541).

raggi, come ha dimostrato benissimo Newton con l'esperienza; ... »[30].

Huyghens dunque non ha preso di petto l'argomento della natura della luce, come avevano fatto padre Grimaldi e Newton. Tuttavia in quelle poche pagine si trovano espressi dei concetti fondamentali, che sul momento non ebbero seguito e non furono sviluppati anche perché il loro autore non se ne occupò come avrebbero meritato; ma che hanno costituito un'arma potentissima nelle mani degli scienziati di un secolo più tardi.

Per la documentazione, ci riferiamo alla edizione latina dell'opera, che uscita in francese col titolo *Traité de la Lumière* nel 1691, come abbiamo già detto (e ciò appena quattro anni prima della morte dell'autore), fu poi tradotta in latino nel 1728 per cura di Gravesande (il già citato *Tractatus de Lumine*).

Essa consta di sei capitoli; di cui il primo parla della propagazione della luce (« De radiis directis »); il secondo, della riflessione; il terzo, della rifrazione; il quarto, della rifrazione atmosferica; il quinto, della meravigliosa rifrazione dello spato d'Islanda (« De miranda refractione crystalli islandici »); e il sesto, di questioni di ottica pratica.

Anche Huyghens, come i predecessori, comincia l'opera mettendo a nudo l'insufficienza delle teorie precedenti, in blocco, e trovando strano che si siano gabellati per sicuri e dimostrati dei discorsi poco chiari, per esempio quelli addirittura iniziali e fondamentali sulla traiettoria rettilinea della luce, e quelli sull'incrocio reciproco dei raggi, che non si disturbano mai a vicenda.

È interessante notare come Huyghens cominci con l'attaccare gli avversari ritorcendo contro di loro l'arma di cui più si valevano essi stessi per attaccare la propagazione ondulatoria: la presunta traiettoria rettilinea della luce: perché egli non trova ragionevole che la luce corpuscolare penetri dentro la materia senza subirne uno scompaginamento, una diffusione, e non ritiene soddisfacenti i modelli di Cartesio e di padre Grimaldi e di Newton, per giustificare come questo possa avvenire.

[30] Huyghens, *Tractatus de lumine* cit., p. 77. Interessante al riguardo ciò che egli scrive a Leibnitz il 24 agosto 1690, inviandogli una delle primissime copie del *Traité de la lumière*: « Je n'ay rien dit des couleurs dans mon Traité de la Lumière, trouvant cette matière très difficile; sur tout à cause de tant de manières differentes dont les couleurs sont productées » (*Oeuvres complètes de Chr. Huyghens*, 1901, vol. IX, Correspondence, N. 2611, p. 470).

Passa poi a dimostrare che la luce deve essere moto. « Nullum dubium esse potest quin lumen constet ex motu certae cuiusdam materiae ». L'affermazione non potrebbe essere più recisa: *non vi può essere* alcun dubbio che la luce consista nel movimento di una certa qual materia.

Questo stile contrasta palesemente contro le riserve, le cautele, e i pentimenti dei fautori della luce materiale. Ma le ragioni di tanta sicurezza? Eccole. La produzione della luce, sulla terra, avviene principalmente dal fuoco e dalla fiamma, cioè da corpi in movimento rapidissimo; e se concentriamo la luce, come con uno specchio ustorio, essa brucia gli oggetti come se fosse fuoco, cioè ne disgrega le parti: « ciò che certissimamente indica moto, almeno in quella sana Filosofia » come la intendeva lui e come abbiamo già riferito.

Inoltre il fatto che per ottenere la visione occorre eccitare i termini del nervo sul fondo dell'occhio, per Huyghens, concorda con l'idea che la luce sia movimento della materia fra l'oggetto visto e l'occhio stesso.

Più ancora, due o più moti propagantisi in direzioni diverse possono incrociarsi e sovrapporsi senza disturbarsi a vicenda, in base appunto ai principi della meccanica, che fa largo uso della composizione e della scomposizione dei moti, mentre non è proprio comprensibile come ciò possa avvenire negli incroci di sciami di particelle materiali.

E infine, come il fenomeno avviene per il suono, così deve avvenire per la luce. In venti secoli, quante volte non sarà stato tirato in ballo questo parallelo!

Huyghens ritiene sufficienti questi argomenti per ripetere a mo' di conclusione, che « non vi è dubbio che anche la luce arrivi da un corpo luminoso a noi come moto impresso alla materia interposta; dal momento che, come abbiamo visto, ciò non può avvenire per mezzo di una qualche sostanza che si propaghi dall'oggetto luminoso fino a noi » [31].

Veramente, se si pensa quanto avevano scritto sull'argomento i predecessori, bisogna riconoscere che Huyghens, nonostante la sua

[31] « Non autem dubium est, quin lumen etiam a corpore lucido ad nos usque pertingat ope motus impressi materiae interjectae, quandoquidem, ut jam vidimus, hoc non potest fieri ope corporis cuiusdam quod ab objecto lucido ad nos commearet » (Huyghens, *Tractatus de lumine* cit., p. 3).

vera Filosofia, era stato molto sbrigativo: forse troppo. Ciò conferma quello che avevamo osservato poco prima: l'autore non ha dedicato troppo tempo né troppa attenzione a questo soggetto. È il caso di dire che ha esagerato nel lesinare il tempo e l'attenzione!

D'altra parte la questione se la luce era moto o materia, era stata talmente dibattuta e con tutti gli argomenti in pro e in contro era divenuta talmente incerta, che l'abbracciare l'una o l'altra soluzione era subordinato al valore che uno, soggettivamente, attribuiva a certi piuttosto che a certi altri di questi argomenti. E Huyghens dice: preferisco il moto alla materia. Una volta presa questa decisione, inizia l'opera di inquadramento dei fenomeni ottici fondamentali.

Trova che l'esistenza della velocità della luce, che frattanto Roemer aveva misurato nel 1675, per quanto negata da Cartesio, era un argomento in accordo con le sue vedute; e passa a discutere il parallelo fra luce e suono.

Questo parallelo, che aveva sempre avuto il suo punto debole nel fatto che del suono non si conoscevano le ombre, mentre la luce si ostinava (per chi non voleva vedere la diffrazione) a camminare in linea retta, veniva reso ancora più scabroso nella seconda metà del 1600, dal fatto che dopo l'invenzione delle macchine pneumatiche e di quelle a vuoto torricelliano era stato dimostrato che il suono non si propaga nel vuoto, mentre la luce sì.

Huyghens dunque si trova a dover affrontare il problema del mezzo in cui si deve propagare la luce, problema che ha dato tanto filo da torcere a tutti gli scienziati di tutti i tempi. Egli ragiona così: il suono si propaga nell'aria (che è un insieme di particelle materiali molto piccole e molto mobili) in virtù della forza elastica, ossia in virtù della reazione alla compressione. Varie esperienze ben note dimostrano che più grande è la durezza di una sostanza, più alta è la velocità di propagazione delle onde elastiche; dunque per spiegare la propagazione di onde veloci come quelle luminose occorre ammettere che esiste una sostanza eterea, cioè estremamente più sottile di tutta la materia, capace di compenetrare tutti i corpi e di riempire tutto lo spazio e al tempo stesso dotata di un altissimo grado di durezza e di elasticità. E aggiunge: « Non è necessario che esaminiamo quale sia la causa di quella elasticità e di quella durezza perché ciò porterebbe troppo lontano dal nostro argomento » [32].

[32] Ivi, p. 11.

Veramente Huyghens poteva trovare una scusa un po' più plausibile; per quanto il suo tempo fosse prezioso, poteva dedicarne un pochino di più a spiegare un punto così misterioso per tutti, specie ai suoi tempi; tanto più che un cenno di modello lo fa seguire subito proponendo di considerare le particelle eteree, per quanto sottilissime, come composte da aggregati di altre particelle ancora più piccole, e la elasticità come dovuta al movimento estremamente rapido di una materia sottile capace di entrare anche fra quelle particelle e di farne disporre la struttura in modo da lasciare l'adito massimo a quella materia fluida. Egli aggiunge che con questo ha esteso all'etere il modello cartesiano della elasticità, con qualche perfezionamento. Però dal modo come presenta le cose, si vede chiaro che egli non vuole impegnarsi sull'argomento, e infatti aggiunge subito che non bisogna poi meravigliarsi per il fatto di postulare una sostanza sottilissima ed elastica; perché « mentre ignoriamo la causa vera della elasticità, vediamo quasi ogni giorno molti corpi che hanno questa proprietà; così non facciamo niente di straordinario se la attribuiamo anche a dei corpuscoli minutissimi, che non vediamo, come quelli della materia eterea ». In conclusione all'etere si richiede soltanto che sia una sostanza elastica uniformemente.

Superato così il primo scoglio, Huyghens si occupa della propagazione delle onde in questo etere. Naturalmente si deve preoccupare del fatto obbiettato da tanti e da tanto tempo, che la propagazione in un fluido avviene per azioni sferiche secondarie, da ciascun punto in tutte le direzioni, come l'incendio di cui portava l'esempio padre Grimaldi. Ma proprio a questo riguardo Huyghens ha avuto quell'idea geniale che ha eternato il suo nome: l'inviluppo delle onde elementari.

È interessante anche il ragionamento con cui giunge a formulare il suo concetto. Egli cita il caso di una fiamma, i cui punti emanano tante onde, ciascuno per conto proprio; queste, una volta entrate nell'etere, si propagano una indipendentemente dall'altra, perché i moti singoli si comunicano alle varie particelle dell'etere indipendentemente gli uni dagli altri, e anche da eventuali altri movimenti che le particelle stesse possono avere (come le onde sonore si propagano nell'aria senza risentire gli effetti del moto delle particelle materiali di questa). Ciò premesso, egli nota come straordinario e incredibile che le singole onde emesse da sorgenti così minuscole

possano essere sentite a grandi distanze, come quelle tra le stelle e noi, o anche tra il Sole e noi. Come è possibile spiegare questo?

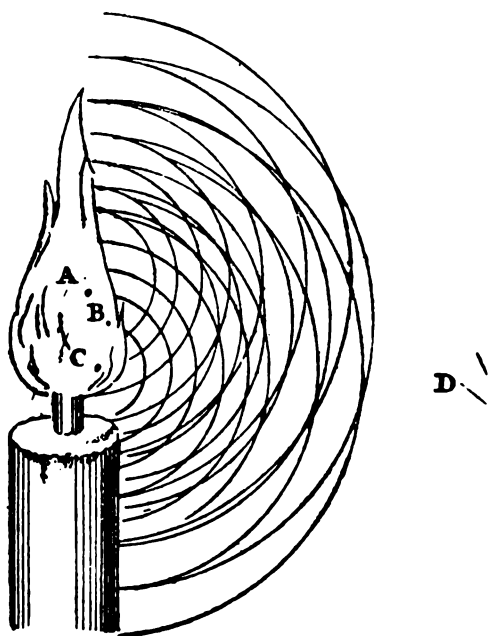



Fig. 27 Come si propagano le onde emananti dai vari punti di una fiamma (dal *Tractatus De Lumine* di Huyghens, Amsterdam 1728).

« Non ce ne meraviglieremo più, egli spiega, se consideriamo che lontanissimo dal corpo luminoso un numero enorme di queste onde, sia pure emesso da tanti punti diversi di quel corpo, si uniscono fra loro, dando un'unica onda, capace di essere sentita ». Ecco il concetto dell'inviluppo delle onde emesse dai vari elementi di una sorgente estesa.

Allora passa alla estensione di questo concetto al caso della propagazione di un'onda emessa da un'unica sorgente puntiforme. È vero che in ogni punto dove arriva il moto ogni particella diventa

centro di nuove onde sferiche (come padre Grimaldi a
messo in chiaro, e come Newton aveva bene illustrato ne

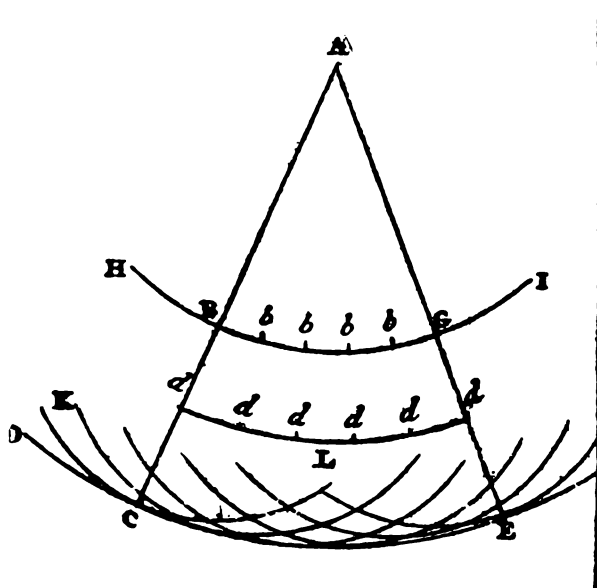



Fig. 28 - L'inviluppo delle onde elementari, come è schematizzato da
nel *Tractatus De Lumine*, Amsterdam 1728.

dei suoi *Principia*), ma ciascuna di queste onde elementari
dinariamente debole, e l'effetto sarà visibile e sensibile sc
dove si formerà un inviluppo di queste onde elementari
definitiva sul nuovo fronte di onda che ha il centro nella
La superficie d'onda viene così a funzionare come la fiaı
l'esempio precedente.

In questo meccanismo Huyghens ha visto la chiave
per spiegare la propagazione rettilinea nei mezzi omogenei,
sione, la rifrazione, e la doppia rifrazione. In realtà vi e
di più; ma egli non ne ha avuto sentore.

Perché Huyghens non si è voluto occupare della di

anche quando questa gli offriva il miglior appoggio per la sua teoria.

È un caso così strano, che ne abbiamo voluto indagare le ragioni: e riteniamo di averle trovate nella mancanza di preparazione matematica, circa la cinematica e la dinamica dei moti oscillatori.

Infatti, per quanto il concetto di « fase » e di « interferenza » già cominciasse ad affiorare sia negli « accessi » dei corpuscoli di Newton, sia in vari ragionamenti di Hooke e di Huyghens, era ancora troppo modesta la conoscenza della cinematica del moto ondulatorio, e tanti problemi si presentavano così complicati alla mente degli studiosi, che essi rifuggivano dal tentarne la soluzione.

Per questa ragione, tra le altre, si può dire che il concetto di Huyghens non ebbe seguaci immediati. Era troppo difficile e inconcepibile nella sua semplicissima verità. Anche una mente matematica potente come quella di Newton non lo poté apprezzare; forse perché offuscata da un preconcetto, ma molto più probabilmente perché non era addestrata a questo tipo di ragionamenti.

Infatti, il punto discusso, su cui i pareri continuavano a restare ostinatamente inconciliabili era proprio quello della propagazione rettilinea. Huyghens aveva portato degli argomenti a favore del meccanismo ondulatorio, a questo proposito e aveva risolto esaurientemente il problema per ciò che si riferiva a un arco di onda aperto. Ma la parte avversa faceva osservare che se egli avesse limitato il fronte d'onda con un diaframma, le onde elementari dovevano dilagare dietro la parte opaca del diaframma stesso. Al che Huyghens replicava che, trattandosi di onde elementari che non davano inviluppi, il loro effetto era trascurabile e esse dovevano restare insensibili. Ma gli altri non erano di questa opinione e le figure di Newton dimostrano chiaramente che cosa ne pensasse lui.

Ora, quando si tratta di decidere se una certa grandezza è trascurabile o no, non c'è che un mezzo: calcolarla o misurarla. Ecco quello che nessuno ha fatto a quell'epoca; appunto come dicevamo, perché mancava l'algoritmo per eseguire questa integrazione di tanti moti ondulatori, così variabili con continuità. E di fronte a questa complicazione matematica e quindi concettuale, la discussione restava nell'ambito delle opinioni.

E pensare che l'esperienza era già stata fatta, perché la diffrazione aveva dimostrato ai seguaci della teoria corpuscolare che la luce girava un po' dietro gli ostacoli opachi!

Huyghens, che aveva le onde, sia pure elementari, dilaganti dietro gli ostacoli, non si occupa affatto della diffrazione e si irrigidisce nel considerare del tutto insensibili le onde che non danno inviluppi al di là degli ostacoli, senza per altro definire mai se la zona di inviluppo terminava con una degradazione continua o con una discontinuità. Egli sentenzia: « E quindi i raggi della luce possono considerarsi come se fossero del tutto linee rette » [33].

Per vedere questo collegamento fra le onde elementari e la diffrazione ci volevano più di cento anni, e ci voleva un medico e un ingegnere di ponti e strade.

Col suo meccanismo, invece, Huyghens spiega benissimo la riflessione e le sue leggi; e ciò considerando l'inviluppo delle onde elementari emesse dalle particelle della superficie riflettente man mano che vengono colpite dall'onda incidente. Le figure del suo trattato sintetizzano bene il ragionamento, del resto ben noto.

Lo stesso ragionamento poteva essere applicato alla rifrazione, pur di ammettere una diversa velocità della luce nei due mezzi separati dalla superficie rifrangente. L'argomento era a doppio taglio, perché da una parte offriva il grande vantaggio di richiedere una velocità minore nei mezzi più densi, con piena soddisfazione del buon senso, anche se ciò non era gradito a Cartesio e a Newton; ma dall'altra parte bisognava spiegare perché queste onde avevano una velocità diversa nei vari mezzi. Non si erano affidate all'etere? E l'etere non compenetrava tutti i corpi? Non era stato detto che l'etere elastico e duro era necessario per spiegare la grande velocità della luce? E ora come poteva la materia variare questa velocità che doveva dipendere soltanto dalla elasticità e dalla durezza del mezzo?

Huyghens propone tre soluzioni; ma in realtà non fa che impostare un problema su cui si dovevano affaticare le menti più eccelse dei posteri. Egli premette che non considera i corpi come spugne o come pane lievitato, ma come « un mucchio di particelle a contatto, e tuttavia in condizioni di non riempire lo spazio ». Egli poi dimostra che gli interstizi debbono essere pieni di etere e quindi propone tre soluzioni per spiegare la trasparenza alla luce:

[33] « Et hinc radii luminis spectari possunt quasi essent totidem lineae rectae » (ivi, p. 16).

1) Quando la luce passa dal vuoto in un mezzo trasparente, il moto ondulatorio viene comunicato dall'etere esterno alla materia del corpo: supponendo questa meno elastica dell'etere, si giustifica la minor velocità della luce nella materia rispetto al vuoto.

2) Il moto ondulatorio continua ad essere trasmesso dall'etere che riempie gli interstizi tra le particelle materiali del corpo, e il dover passare tra tanti meati ristretti lo costringe a una diminuzione di velocità.

3) Il moto ondulatorio è trasmesso sia dalla materia sia dall'etere; questo almeno nei casi particolari dei corpi birifrangenti.

Non si può negare che ogni sforzo era fatto per risolvere il problema, ma non si può negare neppure che il tutto poteva non soddisfare dei critici un po' minuziosi. Tanto più che, strano a dirsi, da questo modello sorgeva una difficoltà curiosa: come era possibile che un corpo fosse opaco? Non doveva aver luogo sempre la trasmissione delle onde elastiche nella materia, o, peggio ancora, nell'etere contenuto negli interstizi molecolari?

Uno poteva fare appello a una mancanza di elasticità delle particelle dei corpi opachi; ma Huyghens esclude che si debba parlare di « mollities », ossia di mancanza di durezza delle particelle stesse, perché l'argento e il mercurio sono opachi e al tempo stesso sono proprio i corpi meglio riflettenti; è invece portato ad ammettere, come soluzione più verisimile, che i corpi opachi siano composti di particelle dure e molli frammiste (neanche a farlo apposta l'argento e il mercurio sono anche corpi semplici!) di cui le prime servono alla propagazione e quindi anche alla riflessione, mentre le altre servono a smorzare il moto e quindi alla opacità. I corpi trasparenti mancherebbero di queste particelle molli smorzatrici.

Ciò premesso, taglia corto; ritiene di aver detto abbastanza per passare senz'altro a spiegare la rifrazione in base al meccanismo delle onde elementari inviluppate, supponendo variata la velocità della luce quando varia il mezzo in cui essa si propaga.

Questa spiegazione è così nota che non è il caso di fermarcisi; Huyghens la estende alla riflessione totale, che si verifica quando è impossibile la formazione dell'inviluppo nel mezzo dove la luce ha velocità maggiore, e giunge a dare la ragione del perché questa specie di riflessione è di maggior rendimento di ogni altra.

Il pericoloso argomento della riflessione parziale sulle facce tra-

sparenti mette a dura prova la nuova teoria. Huyghens ne attribuisce la causa alla riflessione sulle particelle del mezzo esterno che toccano la superficie riflettente e forse su quelle dell'aria e di altre sostanze mescolate all'etere, e di questo più grosse. Però confessa che non è soddisfatto [34], specialmente perché la riflessione stessa avviene anche quando il corpo è immerso nel vuoto. Quanto mistero in questo fenomeno in apparenza così semplice e innocente! Ha saputo tenere in scacco i sapienti di tanti secoli, e uomini come padre Grimaldi, Newton e Huyghens!

Il Capitolo della rifrazione è chiuso dimostrando con eleganza e semplicità il principio del cammino ottico minimo, che Erone aveva dimostrato per la riflessione e che Fermat pochi anni prima già aveva esteso alla rifrazione.

Huyghens passa quindi allo studio della doppia rifrazione dello spato d'Islanda e ne dà una spiegazione che è un vero capolavoro [35]. Dal momento che le onde rifratte sono due, egli è condotto a concluderne che le velocità di propagazione entro lo spato debbono essere due; e siccome un'onda rifratta segue le leggi ordinarie e l'altra no, egli conclude che la prima deve essere sferica e la seconda di altra forma. Suppone che questa sia a forma di ellissoide, vi applica il principio delle onde elementari inviluppate e ne deduce il comportamento per le varie condizioni d'incidenza, con una corrispondenza veramente mirabile coi dati sperimentali.

Restava da dare una ragione di questo sdoppiamento della velocità nell'interno del cristallo; e per questo viene chiamato in causa il terzo meccanismo di propagazione nella materia, citato a proposito della rifrazione: un'onda si propaghi nell'etere compreso fra le particelle materiali, e l'altra in queste particelle stesse. Anzi, supponendo che queste abbiano forme particolari, come del resto risulta dalla struttura macroscopica del cristallo, non si trova difficoltà ad ammettere che la velocità debba essere diversa nelle varie direzioni; tanto da dare all'onda la forma di un ellissoide.

[34] « Fateor hic superesse difficultatem aliquam... » (ivi, p. 32).

[35] Scriveva G. W. Leibnitz a Huyghens nel 1690: « ... Mais quand j'ai vû que la supposition des ondes spheroidales vous sert avec la même facilité à resoudre les phenomènes de la refraction disdiaclastique du crystal d'Islande, j'ay passé de l'éstime à d'admiration » (*Oeuvres complètes de Chr. Huyghens*, Ed. 1901, Correspondence, vol. IX, p. 522, N. 2628).

Fig. 29 Fac-simile di uno schizzo autografo di Huyghens, per rappresentare l'inviluppo delle onde elementari rifratte. Quella concentrazione di segni neri confusi è la rappresentazione « parlante » della vera idea di Huyghens: le onde sono sensibili soltanto là ove se ne sovrappongano molte di quelle elementari (da *Oeuvres complètes de Christian Huyghens*, vol. XX, L'Aia 1937, p. 420).

Huyghens, naturalmente, rimane entusiasta di questa idea e si attarda a dedurne conseguenze e a verificarle con l'esperienza; trovando un accordo che egli stesso chiama « meraviglioso » [36].

Se non che il proseguire delle esperienze doveva procurargli delle amarezze: proprio quelle sulle quali, naturalmente, Newton si fa un dovere di insistere.

Come si è già ricordato a proposito della « XXXV Quaestio » di Newton, se i due raggi, uno ordinario e uno straordinario, che escono da un cristallo di spato, si fanno passare attraverso a un secondo cristallo, in generale si sdoppiano di nuovo tutti e due; ma per certi orientamenti non si sdoppiano affatto; mentre inviando in queste condizioni stesse un raggio di luce direttamente sul secondo cristallo, si sdoppia immancabilmente. Ciò vuol dire che le onde uscite dal primo cristallo non sono più come quelle che vi erano entrate, ma hanno qualche cosa di proprio, che le fa comportare diversamente da quelle solite (dette *naturali*) rispetto al secondo cristallo.

[36] Huyghens, *Tractatus de lumine* cit., p. 64.

Huyghens si confessa impotente a definire la ragione *meccanica* di questo fenomeno. Anche egli ora ripiega sopra una « dispositio » di buona memoria e scrive: « ... sembra di dover concludere che le onde di luce, per il fatto che hanno attraversato il primo cristallo, acquistano una certa qual forma o disposizione, per cui quando incontrano un cristallo orientato opportunamente, possono muovere le due diverse materie, che producono le due diverse rifrazioni; e muoverne soltanto una se incontrano un cristallo disposto diversamente. Per spiegare in che modo questo avvenga non mi è stato possibile trovare nulla che mi soddisfaccia.

Pertanto lascio meditare queste cose ad altri... » [37]

E con questo si chiude la parte del *De Lumine* che contiene le idee di Huyghens sulla natura della luce.

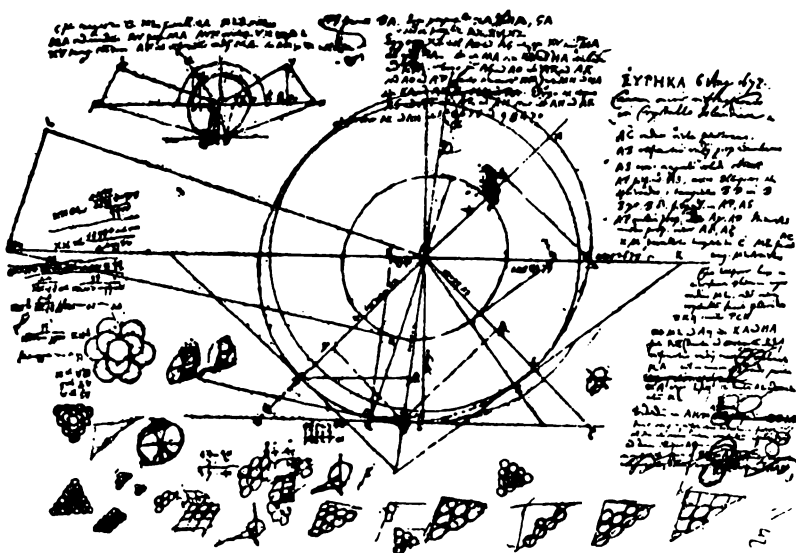
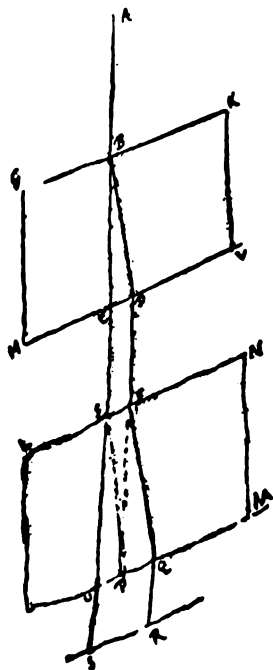



Fig. 30 - Fac-simile di un autografo di Huyghens di interesse particolare. In alto a destra è scritto: « Eureca. 6 Agosto 1677. La causa della meravigliosa rifrazione del cristallo d'Islanda ». Dalla citata edizione delle *Oeuvres complètes de Chr. Huyghens*, p. 426.

[37] Ivi, pp. 68-9.

Fig. 31 - Fac-simile dell'autografo di Huyghens, dove è rappresentato il caso misterioso della doppia rifrazione attraverso due blocchi consecutivi di spato d'Islanda. Le linee tratteggiate rappresentano i due raggi che sono scomparsi. Chi sa quanto l'autore si sarà stillato il cervello su quei due segmenti, prima di giungere alla dichiarazione di rinuncia!

Non molte, ma buone. Huyghens non ha toccato molte questioni; altre le ha lasciate incompiute. Da ciò che egli dice esplicitamente e da ciò che si legge fra le righe del suo scritto, traspare l'intenzione di perfezionare le costruzioni incomplete e di colmare le lacune lasciate. Probabilmente egli si è incanalato per una via senz'uscita, perché sembra che andasse cercando nuovi meccanismi e nuovi artifici per guidare il cammino delle onde, e non si domandasse mai: ma queste onde come sono? Da quali leggi sono governate? Da quali parametri dipendono?

Anche a questo proposito riappare l'insufficienza della preparazione matematica. Assistiamo infatti al caso di Huyghens che viene spinto dall'evidenza a postulare una « forma » o una « disposizione » nelle onde e che ancora non si domanda in che modo si potevano rappresentare queste onde e come si poteva studiare la « forma » loro.

Ma i tempi maturavano. Non è priva di interesse la circostanza

che i primi studi sulle onde dal punto di vista matematico e quantitativo si trovano proprio nel libro principe di Newton, nei *Philosophiae naturalis principia mathematica.*

Newton stesso preparava col suo ingegno e col suo lavoro il trionfo della teoria a cui nella maniera più esplicita si era dichiarato avverso.

Capitolo sesto

DAL SETTECENTO ALL'OTTOCENTO

Si suol dire che il decimottavo fu il secolo del trionfo della teoria corpuscolare newtoniana. Crediamo che la frase, come viene intesa comunemente, porti ad una sopravalutazione del fenomeno storico, man mano che il tempo ce lo allontana e ce ne fa svanire le sfumature. Dall'esame dei documenti e delle opinioni dell'epoca, si acquista un concetto assai diverso da quello che uno generalmente si forma con la frase ordinaria.

Bisogna distinguere fra il pubblico generico, anche colto, e quello ristrettissimo degli studiosi specifici della materia.

Il primo non va per il sottile; sente l'eco delle cose grosse, non ha modo di criticarle, e le assorbe e le esalta, purché siano accessibili e presentate bene. Ha un'inerzia colossale, data la sua mole, e una volta imbevuto di un'idea impiega dei tempi molto lunghi a liberarsene. Riceve le notizie da tante origini diverse, e ne assorbe più il contenuto filosofico che quello tecnico.

Non c'è da meravigliarsi se in un ambiente di questo genere la teoria di Newton ebbe molta fortuna. Nel secolo decimosettimo le idee avevano subìto quella evoluzione a cui erano legati i nomi di Cartesio e di Galileo; e il pubblico non domandava altro che meccanismi materiali da sostituire alle elucubrazioni inafferrabili dei peripatetici superati.

L'aver dato alla « luce » un modello atto a « spiegarne » la riflessione e la rifrazione nell'ambito stesso dei fenomeni gravitazionali, con tanta semplicità concettuale; l'aver incorporato in questo schema i « colori », su cui la filosofia peripatetica teneva ancora un'ipoteca tenace, e ciò in modo così semplice e organico, non poteva non

costituire un successo abbagliante, per chi vedeva le cose dal di fuori, in via generale, in via sommaria. Se anche c'era qualche riserva, qualche angolo molto oscuro, la bellezza dell'insieme era tale, che ognuno era portato a dire: « È impossibile che in tutto ciò non ci sia del vero; il progredire degli studi svelerà il mistero che regna ancora in quelle minuzie ribelli, e le inquadrerà in tutto il resto. Siccome poi cose perfette a questo mondo non ci sono, e quindi qualche nuovo fenomeno da spiegare ci sarà sempre, il fatto che ora ve ne siano non infirma la verità della teoria ».

Perché non bisogna sottovalutare la circostanza che la diffrazione e l'interferenza, ma la prima specialmente, sono fenomeni pochissimo conosciuti e pochissimo familiari, ed è enormemente più probabile incontrare una persona che li ignori completamente, che una che li conosca a fondo. Ancor oggi nella massima parte dei testi di *ottica*, viene data tutta l'estensione del caso, commisurata alla mole dell'opera, alla esposizione delle leggi generali sotto forma geometrica; poi si trova aggiunto un capitolino in cui è accennato che però le cose sperimentalmente vanno in modo un po' più complesso, perché esistono quei due fenomeni che disturbano assai i bei discorsi geometrici precedenti, quando si entra nelle minuzie. Come risultato quasi generale, nei lettori si forma il concetto che la diffrazione e l'interferenza siano delle piccole seccature trascurabili, di cui si può benissimo ignorare la natura e le leggi, senza per questo abbassare il livello della propria cultura.

Se questo avviene oggi, che di questi fenomeni si conoscono i più minuti particolari, figuriamoci che cosa doveva avvenire due secoli fa, quando essi fenomeni costituivano un enigma insolubile anche per uomini della levatura di Newton e di Huyghens!

Si sa benissimo che tutte le cose di questo mondo non sono perfette e che in particolare le teorie fisiche sono dei modelli molto provvisori. Se anche uno ci crede profondamente, non può non vedervi dei lati deboli; a meno che non sia del tutto accecato dalla propria fede. Chi non vuol passar la vita a fare lo « scettico » e a ripetere ogni momento che tutto è provvisorio, e che non c'è nulla di vero in via assoluta e altri discorsi vecchi, monotoni e anche demolitori, bisogna che prenda quello che c'è di buono e abbia fiducia in un prossimo futuro per la spiegazione di ciò che ancora rimane insoluto. Anzi, il pubblico è avido di questo.

Però in queste condizioni l'abbracciare una teoria o un'altra è questione di gusti o di opinioni. Dal momento che una teoria per-

fetta non c'è, tra le altre, imperfette, e quindi tutte egualmente non vere, la scelta è personale o dettata da ragioni contingenti, estranee alle teorie stesse. Molte volte dipende dal trovare un sostenitore potente e attivo: quello che si chiama un « apostolo ».

Ebbene, esaminando l'opera di Cartesio, di padre Grimaldi, di Newton e di Huyghens, si vede che il primo, occupandosi di tante cose, alla « luce » ha dedicato troppo poco tempo e non vi ha lasciato traccie profonde; padre Grimaldi vi ha lavorato molto, ma non ha preso un partito definito, e poi è morto troppo presto, prima ancora che l'opera sua fosse pubblicata; Huyghens si è occupato della luce un po' a tempo perso, toccando soltanto alcuni punti di tutto il grandioso problema e dando l'impressione di un tentativo quasi non riuscito: e soprattutto insistendo sopra un argomento difficile, pochissimo noto, quale è quello della birifrangenza, e trascurando assolutamente l'argomento più di attualità, quale la teoria dei colori; egli stesso tiene la sua opera nascosta per tanti anni e la pubblica quando sente avvicinarsi la sua fine, perché non vada persa del tutto.

Invece Newton, uomo potente, scienziato di gran fama, scopritore dei princìpi della meccanica, ha lanciato, sostenuto e inculcato le sue idee in fatto di ottica per oltre sessanta anni, con una tenacia e una fermezza, che è rimasta storica, sostenendo polemiche da tante parti, non dando mai segno esteriore di dubbio o di debolezza, dimostrando invece convinzione assoluta e fede completa nella vittoria del suo indirizzo.

E al tempo stesso arricchiva il patrimonio sperimentale della fisica di una ricca messe di risultati nuovi.

Il pubblico non poteva non venir trascinato dalle idee di un così grand'uomo: erano facili, conclusive, belle; mancavano effettivamente di rivali altrettanto accessibili e complete. Per giunta si inquadravano bene tra le idee filosofiche dell'epoca. Avevano qualche lacuna e qualche mistero? Intanto Newton aveva avuto cura di non mettere troppo in evidenza i punti deboli, e quando ne era stato costretto,... ne aveva lasciato ai posteri il compito della soluzione. Ebbene, il pubblico, che non poteva apprezzare la vera portata di questi misteri residui, perché difficili in sé, poco sperimentati, e... presentati *ad usum delphini*, non poteva per questo perdere ogni fiducia nell'avvenire, e doveva restare in attesa tranquilla che le teorie seguissero il loro naturale sviluppo per opera dei prosecutori, nella scia del grand'uomo ormai vecchio ed esaurito.

Francamente non c'è da meravigliarsi, se la teoria corpuscolare ha avuto un secolo di successo nel pubblico generico; sarebbe stato ben strano, se fosse avvenuto il contrario!

La cosa è ben diversa nell'ambiente dei cultori specifici della materia. Esaminando le opere che trattano della luce, nel periodo successivo a Newton, c'è da domandarsi se una vera teoria corpuscolare sia mai esistita nell'ambiente scientifico più elevato.

Perché in questo ambiente si sapeva bene che non era una forma retorica quella che Newton aveva dato al suo libro di ottica. Come abbiamo rilevato a suo tempo, Newton, come del resto padre Grimaldi, non si è pronunziato decisamente per una teoria corpuscolare, perché lui sentiva che non la poteva sostenere; perché conoscendo bene i fenomeni di interferenza, di diffrazione e di doppia rifrazione, sapeva benissimo che il modello corpuscolare non ci si poteva adattare. E questo i contemporanei glielo hanno detto senza complimenti: e non soltanto Huyghens, ma soprattutto Hooke, che era di soli sette anni più anziano di Newton, nonché segretario della *Royal Society* di Londra. Fra i due non è regnato mai buon sangue, e la discussione è degenerata talvolta anche in polemica; al punto che Newton ha differito la pubblicazione del suo trattato di ottica al 1704, perché soltanto l'anno prima Hooke era passato a miglior vita [1].

Così pure avversario dichiarato fu il grande Leibnitz, anche lui quasi contemporaneo di Newton [2]. Mentre Hooke, studioso e ricercatore dei fenomeni ottici, attaccava specialmente su argomenti di natura sperimentale e con basi piuttosto tecniche, Leibnitz criticava del lato filosofico più generale l'indirizzo di chiamare con parole nuove e solo apparentemente più significative, come quelle di « forza » e « attrazione », delle proprietà altrettanto misteriose e occulte come quelle postulate dagli scolastici, e vedeva in questo procedimento un tradire i concetti meccanicistici della filosofia naturale del secolo.

Fra gli avversari più notevoli della metà del Settecento va rilevato Eulero [3], persona certamente di molta autorità, matematico famoso, e noto tra l'altro, per aver dimostrato che rifrangenza e dispersione non sono proporzionali, e che pertanto era possibile

[1] Cfr. T. Young, *Lectures on natural philosophy*, Taylor & Walton, Londra 1845, Lecture XL, p. 378.

[2] Gottfried Wilhelm Leibnitz era di quattro anni più giovane di Newton, perché era nato (a Lipsia) nel 1646; morì ad Hannover nel 1716.

[3] Leonhard Euler nacque a Basilea nel 1707 e morì a Pietrogrado nel 1783.

acromatizzare gli obbiettivi mediante la opportuna combinazione di due lenti di vetro diverso. Si trova nella *Dioptricae* il seguente « Scholion »: « Quell'inconveniente dovuto alla diversa natura dei raggi che anche al sommo Newton sembrò così grave da giudicare impossibile assolutamente il liberarne gli strumenti diottrici, ormai è certo che si può facilmente eliminare, almeno per quanto riguarda il margine iridato, a cui specialmente Newton si riferiva; cosicché almeno per questa causa non vi è più ragione di ricorrere ai telescopi catottrici » [4].

Così scriveva Eulero, senza mezzi termini, nel 1769, perché già da quasi quindici anni l'argomento era stato da lui trattato matematicamente e da dodici anni John Dollond [5], ottico inglese (e indipendentemente anche lo svedese Klingesternia) aveva realizzato gli obbiettivi acromatici, portando una vera rivoluzione nella tecnica degli strumenti ottici. Ciò avveniva precisamente nel 1757, circa novant'anni dopo che Newton aveva compiuto i suoi studi sui colori ed aveva affermato il suo famoso « errore ».

La dimostrazione teorica di Eulero e pratica del Dollond non pare che abbia commosso il mondo fisico dell'epoca. Forse perché ciò veniva considerato più come un argomento tecnico che come un fatto di portata scientifica; ma noi riteniamo che ciò non facesse scalpore perché in realtà non faceva che colpire un'idea già morta. Effettivamente il fatto che la dispersione non era proporzionale alla rifrangenza, ossia che la variazione dell'attrazione dei raggi di vario colore non era una funzione caratteristica dei raggi stessi, ma era anche una funzione *complicata* della qualità (e non della sola massa) della materia attraente, metteva sul tappeto un'altra difficoltà grave per la teoria corpuscolare. Ma quest'argomento era uno di quelli troppo sottili per il pubblico grosso, che non poteva apprezzarne la portata; per i cultori specifici non ce n'era bisogno: essi ne avevano abbastanza per valutare la inconsistenza della teoria corpuscolare e questo non aggiungeva gran che di nuovo.

Però se Huyghens, Hooke, Leibnitz ed Eulero rappresentavano

[4] « 328. — Quod ergo incommodum a diversa radiorum natura oriundum adeo grave vel summo Neutono est visum, ut instrumenta dioptrica nullo modo ab eo liberari posse sit arbitratus, id quidem saltem quod ad marginem coloratum attinet ad quem Neutonus imprimis spectabat, jam satis feliciter tolli posse certum est; ita ut saltem ob hanc causam non opus sit ad Telescopia Catoptrica confugere » (Leonhard Euler, *Dioptricae*, Petropoli 1769, Part, I, Cap. VI, p. 265).

[5] John Dollond nacque a Spitalfields nel 1706 e morì a Londra nel 1761.

l'opposizione aperta e dichiarata contro la teoria corpuscolare, non meno pericolosi furono gli *amici* e i seguaci della teoria stessa. È sintomatico che essa teoria non abbia fatto alcun progresso dal punto ove la lasciò Newton; fra i suoi sostenitori non figurano nomi che siano noti per avervi apportato un contributo apprezzabile o che abbiano risolto qualcuno dei problemi che Newton aveva lasciato in eredità. E la ragione è evidente.

Consideriamo l'opera di uno scienziato di primo piano, dichiarato come newtoniano: padre Ruggero Giuseppe Boscovich da Ragusa [6], astronomo di grande valore, e forse troppo dimenticato. Quando morì Newton, egli aveva quindici anni e la sua vita abbracciò quasi tutto il secolo decimottavo.

È molto interessante un suo opuscolo dal solito titolo *De Lumine*, composto di due « *dissertationes* ». La prima tratta delle leggi generali dell'ottica come sono riferite dagli altri e particolarmente da Newton; la seconda contiene una teoria dell'autore, la quale dovrebbe rappresentare un completamento di quella del grande maestro.

Però padre Boscovich seppure comincia col riconoscere che la teoria ottica ha fatto grandi progressi, riconosce anche che « ancora rimane un tratto di cammino lunghissimo, tremendamente aspro e complicato » in cui la natura ha conservato i suoi segreti riposti.

Infatti — continua — seppure si è ormai certi circa i movimenti e le direzioni dei raggi, ci sono alcune cose di certo non ancora abbastanza indagate e scoperte; e anche fra quelle stesse che a prima vista sembrano assolutamente certissime e evidentissime e che vengono prese come base solidissima di tutte le altre, non mancano quelle che, se si ragiona bene e si depongono certi preconcetti infiltrati profondamente nell'animo dalla continua abitudine di affermarli e tenacemente attaccativisi, non solo non si possono considerare dimostrate, ma neppure giustificate da qualche ragionamento abbastanza retto.

E con questo padre Boscovich non se la prende mica con le « cause del moto », le « forze » e « l'intima costituzione dei vari raggi », ecc.; egli nientemeno attacca la propagazione rettilinea della luce e dimostra che la luce *non* si propaga in linea retta! Egli con molto buon senso e con molto acume fa notare che il più delle volte coloro che affermano che la luce procede in linea assolutamente

[6] Padre Ruggero Giuseppe Boscovich nacque a Ragusa nel 1711 e morì a Milano nel 1787.

retta girano in un circolo vizioso, perché non fanno che chiamare retta la via seguita dalla luce. Se invece a questa concezione geometrica si vuol dare un significato assoluto, allora quelli che affermano rettilinea la traiettoria della luce, nella migliore delle ipotesi ragionano come quelli che giudicano piana la superficie terrestre dalla forma della superficie di uno specchio di acqua. Perché se si tien conto del moto dei corpi, delle inomogeneità dei mezzi trasparenti e della diffrazione (o inflessione) della luce, questa non può mai dirsi seguire una traiettoria rigorosamente rettilinea.

Ecco dunque che un seguace della teoria corpuscolare si lancia proprio contro uno degli argomenti fondamentali in favore della teoria stessa e insieme contrario alla teoria ondulatoria!

Egli però riconosce che l'esperienza, nei limiti che ci serve, ci conforta in questa idea della propagazione rettilinea della luce: perfino su essa sono basate delle scienze esatte e quantitative, come l'agrimensura e l'astronomia. « Hoc ipso successu, elati animi ». Ma si deve esser sinceri: la propagazione rettilinea della luce non è dimostrata; è supposta, finché non viene dimostrato il contrario [7]. Stabilita così questa *ipotesi*, si può andare avanti.

Su questa ipotesi non si può essere d'accordo che con la teoria corpuscolare: il paragrafo 33 della Dissertazione Prima espone chiaramente lo stato d'animo. La luce non può consistere in una pressione, perché questa nei fluidi non si propaga con moto rettilineo; non può esser composta di onde, perché queste quando attraversano un foro si espandono in tutte le direzioni, come fa il suono, che attraverso una finestra si sente da tutta la stanza. *Non rimane* che l'effluvio di corpuscoli: « Superest, ut in effluvio quodam consistat corpusculorum... Quel *superest* parla chiaro: si accetta la teoria corpuscolare, proprio per esclusione.

E così la dissertazione prosegue riassumendo l'ottica di Newton (riportando anzi molti pezzi del testo originale), per quanto riguarda la riflessione, la rifrazione, la dispersione e i colori. Una frase è interessante: « Ci sono altre proprietà, da cui dipendono i colori visti nelle lamine sottili, nelle bolle di sapone, come pure i colori dei corpi naturali, le quali però sono molto più difficili a spiegarsi e che *per lo più i fisici tralasciano* » [8].

[7] « ... haec *pro vera* tenenda est, nisi quid in contrarium occurrat » (padre Boscovich, *Dissertatio De Lumine*, De Rossi, Roma 1749, paragrafo 30, p. 17).

[8] Ivi, paragrafo 89, p. 41.

Segue, riportata con le parole originali del testo di Newton, la teoria degli accessi; poi l'autore commenta: « però a questo proposito bisognerebbe approfondire le nostre conoscenze ». Anche le frasi del testamento di Newton, quando lascia ai posteri il questionario dei 31 Quesiti è riportato letteralmente con le parole originali del testo; e segue il commento dell'autore: « Così egli; ma dopo di lui, per quanto ne sappiamo, nessuno ha progredito in questa indagine oltre i limiti che egli aveva raggiunto ».

La prima dissertazione termina con fugace accenno alla complicazione della birifrangenza dello spato d'Islanda.

Per riesumare tutto questo ci voleva un *amico* della teoria corpuscolare, perché « i Fisici per lo più ci passavano sopra ». È il caso di ripetere il vecchio adagio: dagli amici mi guardi Iddio, ché dai nemici mi guardo io!

Padre Boscovich passa alla seconda dissertazione, col proposito di oltrepassare quei limiti che Newton aveva raggiunto; ma in realtà la sua opera è paragonabile più a una demolizione delle idee di Newton che a un rafforzamento con nuovi argomenti in favore. Padre Boscovich, forse per valorizzare il proprio contributo, mette in evidenza i punti deboli del predecessore, e lo fa senza parsimonia, e in certi casi anche con una certa ironia. Per esempio, a proposito delle famose « vices » di miglior trasmissione o di miglior riflessione, egli riporta testualmente la XII Proposizione della II Parte del II Libro di *Optice*, e riporta, sempre testualmente, il brano dove Newton rinunzia a cercare la teoria sulla natura delle « vices » stesse, pur dopo avere accennato a quelle tali onde che avrebbero dovuto precorrere i corpuscoli, preparando loro l'accesso o il regresso nella materia. Infine fa notare che Newton stesso, nel formulare la « XXIV Quaestio » dove ripete le stesse idee circa le « vices », « si esprime già con un po' più di fiducia » perché scrive: « perché i raggi di luce abbiano accessi alterni di più facile riflessione o di più facile trasmissione, *nihil aliud opus est*, non occorre altro che essi siano corpuscoli sottilissimi, che, o con la propria attrazione, o con qualche altra forza eccitino delle vibrazioni nei corpi su cui agiscono ». E padre Boscovich aggiunge: « Ma noi crediamo assolutamente *aliquid aliud opus esse*, che occorra qualche altra cosa! » [9].

Per questo egli esercita una critica serrata contro i principali punti deboli della teoria corpuscolare, senza per altro arrivare al-

[9] Ivi, paragrafo 90.

l'« errore » di Newton, alla diffrazione e alla birifrangenza. Perché egli vuole introdurre l'idea che la materia sia composta di *punti fisici*, dotati di una sfera d'azione; e che questa azione è attrattiva o repulsiva alternativamente, in funzione della distanza fra due punti materiali, con una legge oscillante: per rappresentare la quale, egli riporta una figura, in cui in ascisse sono riportate le distanze fra i due punti fisici, e in ordinate le forze: repulsive, se il segmento rappresentativo è superiore all'asse delle ascisse, attrattive se inferiore.

Con questo modello della materia egli spiega *tutto*:

> Con questa forma della curva affermiamo di spiegare benissimo tutte le proprietà generali meccaniche dei corpi, e moltissime di quelle particolari; cosicché pensiamo proprio che tutte debbano derivarne. Facilmente pertanto di qui possiamo determinare la forma e l'immutabilità degli elementi primi della materia, spiegare la mobilità, l'impenetrabilità e l'estensione dei corpi, l'eguaglianza della azione e della reazione, da cui dipende l'urto dei corpi, le azioni mutue delle particelle della materia alle piccolissime distanze, tanto numerose e tanto varie, e la gravità proporzionale linearmente e direttamente alle masse maggiori su cui gràvita, e inversamente ai quadrati delle distanze, la coesione delle parti, la solidità e la fluidità, l'elasticità, la durezza, la densità, la rarefazione e altre seicento; e tra queste le proprietà della luce, che è lo scopo precipuo di questa dissertazione [10].

Dobbiamo riconoscere che le idee di padre Boscovich erano tutt'altro che modeste; ma dobbiamo anche riconoscere che in confronto alle idee di Huyghens, per il quale la materia era costituita di tanti atomi a forma di sferette tutte tangenti, la concezione ora prospettata rappresenta un decisivo ed effettivo avvicinamento alle idee più moderne, di una materia estremamente rarefatta.

Quanto alla luce, padre Boscovich cerca di dimostrare che la sua ipotesi attrattivo-repulsiva (a cui naturalmente dovrebbero obbedire anche le particelle di lume) permette di superare la maggior parte delle difficoltà contro cui Newton si era dovuto fermare; ma in compenso non digerisce il principio del cammino minimo di Fermat, o quello del minimo sforzo di Leibnitz. Egli si limita a considerare la propagazione rettilinea, la trasparenza, l'opacità, l'emissione e l'assorbimento, la riflessione, la rifrazione e la dispersione. Arriva al paragrafo 129, dopo 57 pagine di dissertazione, e trova che dal suo modello « naturalmente segue ciò che si riferisce

[10] Ivi, II Dissertazione, paragrafo 7.

alla diffrazione »[11], ma trova che non è il caso di fermarcisi[12]. C'è poi anche lo spato d'Islanda; anche per questo le cose sono molto facili con la sua teoria; ma la dissertazione ormai è troppo lunga e bisogna ripiegar le vele. Peccato.

Padre Boscovich ci ha dato in poche pagine l'impressione di quello che doveva essere lo stato d'animo degli *amici* della teoria corpuscolare. Newton aveva lasciato ai posteri un'eredità senza vita: essa era destinata ad essere criticata dagli avversari e distrutta dagli amici. Poteva avere accoglienza festosa soltanto in quegli ambienti superficiali, per così dire estranei alla teoria, o laterali, in cui i fisici per lo più tacevano circa i punti delicati ed omettevano di parlare dei fenomeni scabrosi.

Siccome però questi ambienti sono in gran parte quelli della scuola dove si formano le idee che poi restano impresse per tutta la vita nelle menti della grande maggioranza, messe dalle circostanze nella impossibilità di tutto criticare o anche soltanto di seguire nel progresso, si spiega perché, per circa un secolo, la voce degli avversari della teoria corpuscolare sia rimasta inascoltata e quasi derisa e alla fine del secolo decimottavo anche le menti più elette e gli ambienti più dotti erano impregnati di newtonianesimo. Anzi erano più convinti del maestro, e avevano finito per considerare come grandi scoperte anche quelle idee di ripiego che egli si era guardato bene dall'affermare, ma soltanto aveva messo avanti per non lasciare delle lacune troppo sgradevoli.

Ciò nonostante la teoria corpuscolare era morta. Era morta da sé perché in un secolo e in un ambiente tanto favorevole era rimasta « in quegli stessi limiti, a cui Newton era arrivato ». E le teorie, che hanno valore in quanto sono feconde, se non sono feconde, sono morte.

Per chi si interessa della funzione del dogmatismo nella scienza, vale la pena di rilevare che in sostanza il newtonianesimo del secolo XVIII ha costituito un vero e proprio dogma. I rivoluzionari del secolo XVII avevano lottato per reagire contro il dogmatismo peripatetico e per istaurare nel campo scientifico una mentalità libera, un metodo razionale, una critica serena. Il risultato è stato evidente: al dogma peripatetico è subentrato quello newtoniano;

[11] « ... sponte fluunt quae ad diffractionem pertinent » (ivi, Dissertazione II, p. 57).

[12] « ut nihil in iis immorandum sit » (ivi, Dissertazione II, p. 58).

con l'aggravante che quest'ultimo è stato ben più duro e imperativo del precedente. Il dogmatismo peripatetico era dichiarato e applicato come metodo, alla luce del Sole; invece quello newtoniano non era chiamato dogmatismo, ma era dichiarato frutto dell'indagine sperimentale e razionale, e come tale indiscutibile. Però all'atto pratico era vietato di criticarlo e di porre l'accento sui fenomeni che non rientravano nel suo quadro. Si dovrebbe indurne che l'ambiente scientifico è destinato a passare da un dogmatismo all'altro, come se il dogmatismo ne fosse una necessità inderogabile.

Seppure dal punto di vista teorico dopo il tentativo di padre Boscovich non vi sia niente altro di veramente notevole nel XVIII secolo, a proposito della struttura della luce, il patrimonio sperimentale invece si è ancora arricchito di nuovi fenomeni.

È il caso di ricordare la scoperta della *fosforescenza* (come si chiama oggi) per opera di Vincenzo Cascariolo, calzolaio bolognese. Essendo egli alla ricerca di certe manipolazioni chimiche segrete, provò a calcinare un fossile che si trovava verso la cima del monte Peterno, nei dintorni di Bologna. Egli per caso osservò che questa pietra, quando veniva portata al buio, dopo essere stata esposta alla luce, emetteva una debole luce. Secondo il Priestley, da cui prendiamo questa notizia [13], la scoperta fu fatta verso il 1630.

Il fatto non fu molto notato dall'ambiente scientifico, per tutto il secolo XVII, e se ne trova appena qualche cenno, soprattutto da parte di Atanasio Kircher [14]. Ma quando, sul finire di quel secolo, l'interesse per le teorie sulla natura della luce si fece così acuto, anche su questo strano fenomeno si concentrarono i lavori di ricerca, nell'intento di trovarvi qualche elemento atto a confermare o a distruggere le vedute teoriche.

Dopo numerose esperienze del Conte Marsili di Bologna, di M. Lemery, Galeazzi, Zanotti, Baldwin, P. Beccaria, Du Fay e di innumerevoli altri studiosi, si arrivò a trovare tante altre sostanze naturali e artificiali, che presentavano la strana proprietà del « fosforo bolognese », come veniva chiamato il fossile del monte Peterno. In particolare fu nel corso di ricerche in questo campo che il

[13] J. Priestley, *The History and Present State of Discoveries relating to Vision, Light and Colour*, Johnson, London 1772. Secondo altri la scoperta avvenne nel 1603 o nel 1604.

[14] Nacque a Geysa presso Fulda nel 1601 e morì a Roma nel 1680.

Du Fay scoprì l'emissione di luce da parte del diamante, semplicemente dopo essere stato riscaldato assai a lungo, in piena oscurità.

Questo fenomeno dai più veniva considerato favorevole alla concezione corpuscolare, per quanto, col moltiplicarsi delle esperienze, presentasse tante varietà di manifestazioni e tali bizzarri comportamenti, dal punto di vista cromatico e termico, che in conclusione non portò nessuna reale conferma, né alcun elemento decisamente demolitore a danno delle vedute teoriche sulla natura della luce.

Un'altra scoperta che parve portare qualche argomento a favore della teoria corpuscolare, fu quella dell'« aberrazione della luce » fatta dal Dr. Bradley [15] astronomo reale d'Inghilterra. A cominciare dal 20 dicembre 1725 egli notò nella posizione delle stelle fisse, osservate col suo telescopio, delle anomalie, che in un primo tempo furono attribuite a errori sperimentali, ma poi risultarono regolari, e collegate con le epoche dell'anno. Lo stesso Bradley arrivò a darne la spiegazione, combinando il moto di traslazione della luce inviata dalle stelle verso la Terra col moto di questa intorno al Sole.

Per altro, anche da questo nuovo fenomeno non seguì alcun elemento che servisse a definire meglio le vedute circa la natura della luce.

È ancora di questo secolo l'inizio di un altro gruppo molto importante di studi e di misure; quello relativo alla « misura della luce ».

Considerazioni di natura fotometrica, in senso largo, si trovano in quasi tutti i libri di ottica di cui abbiamo fatto cenno nelle pagine precedenti. Già nel *De rerum natura* di Tito Lucrezio Caro viene considerato l'abbagliamento a cui va soggetto chi guarda fissamente un corpo molto splendente come il Sole; la miglior visibilità di oggetti illuminati quando l'osservatore è all'oscuro, mentre è più difficile la visione di oggetti oscuri da parte di chi si trova in piena luce.

Considerazioni ben più sviluppate in questo senso si sono già rilevate nell'opera dell'Alhazen, di cui abbiamo rilevato lo studio della persistenza delle immagini retinee, e la valorizzazione del fenomeno stesso per dedurne l'esistenza del lume come agente fisico;

[15] James Bradley nacque nel 1692 a Shireborn, Gloucester e morì nel 1762 a Chalford, Gloucester.

ma ben più estese sono tante altre considerazioni che oggi si direbbero di sensitometria visiva.

Ancora più progredite sono le considerazioni fotometriche che si trovano nei manoscritti di Leonardo da Vinci; molte delle quali, poi, furono raccolte nel famoso *Trattato della Pittura*. Come è ben noto, Leonardo da Vinci ha introdotto nella tecnica pittorica lo *sfumato*, che poi, in termini tecnici, è la gradazione fotometrica delle penombre. Egli fece molti e interessanti studi sulle ombre e sulle penombre, come ad esempio quelli accennati nel Codice C, fol. 22r: « Ma se 'l lume grande è distante dal corpo onbroso e 'l lume piccolo li sarà vicino, certa cosa è che l'ombre si potran fare d'equal oscurità o chiarezza.

Se a 2 lumi sarà inframesso con equal distantia un corpo onbroso, esso farà 2 onbre oposite, le quali si varieranno tanto nelle loro oscurità quanto fieno varie le potentie de' 2 lumi opositi che le creano ».

Numerosi sono i discorsi fotometrici nel *Trattato della Pittura*, come ad esempio, quello del paragrafo 672: « Se il gran lume di poca potenza val quanto un piccolo lume di gran potenza ». E quello del paragrafo 626: « *Qual corpo piglia più quantità di luce*. Maggior quantità di luce piglia quel corpo che da maggior lume sarà illuminato ».

In questi brani (e in tanti altri affini) non soltanto si fanno considerazioni di tipo visuale, ma già si delineano discorsi di carattere tipicamente fotometrico, con valutazioni quantitative, anche se non espresse in numeri; ma è già interessante che si cominci a parlare dell'*uguaglianza* delle ombre ottenute con sorgenti di diversa potenza.

E così anche nelle pubblicazioni di ottica del secolo XVI e XVII si nota un crescendo delle considerazioni fotometriche a carattere quantitativo: che l'illuminazione di una superficie da parte di una sorgente di lume va diminuendo quando la loro distanza aumenta, e anche quando l'inclinazione dei raggi rispetto alla superficie illuminata aumenta. Già nelle pagine precedenti è stata riportata una delle ipotesi fondamentali contenuta nei *Photismi de lumine et umbra* dell'abate Maurolico: « I raggi più densi illuminano più intensamente; quelli ugualmente densi ugualmente ».

Particolarmente interessante è la figura (puramente ornativa) in testa al Libro IV dei *Opticorum Libri VI* del gesuita F. Aguilonius, opera stampata ad Anversa nel 1613. Il Libro IV è dedicato a

studi proprio di carattere fotometrico, ma del tipo classico. Però la figura in testa al Libro stesso mostra delle persone intente ad osservare uno schermo illuminato da due sorgenti, con una rassomiglianza veramente notevole con uno dei primi tipi di fotometro.

Però bisogna arrivare al XVIII secolo per trovare uno sviluppo quantitativo preciso delle misure fotometriche.

Alcuni tentativi in questo senso furono fatti da Buffon, che tentò di misurare la percentuale di luce riflessa da uno specchio; ma chi veramente affrontò il problema con molta cura ed abilità e riuscì a superare le innumerevoli difficoltà che si incontrano in questo genere di misure fu Bouguer [16]. Un suo primo *Essai d'Optique* ebbe molto successo; ed egli si propose di scrivere un'opera più completa, alla quale dedicò la miglior parte della sua vita. Per altro egli morì nel 1758 senza che questa opera vedesse la luce. Uscì postuma nel 1760, curata da De la Caille, col titolo *Traité d'Optique*.

Per merito di queste opere il Bouguer fu considerato lo scienziato che, dopo Newton, aveva ottenuto maggiori risultati nello studio delle proprietà della luce. In sostanza egli gettò le basi della tecnica fotometrica, mettendo in evidenza alcuni punti scabrosi, come quello di eseguire sempre « misure di zero », ossia misure in cui variando in modo noto uno degli elementi a confronto, lo si porta ad essere uguale a quell'altro, in modo che all'osservatore rimane solo da decidere se l'uguaglianza è raggiunta o no, e non deve fare alcuna valutazione delle eventuali differenze residue. Con metodi di questo genere, e con cautele veramente sopraffine, il Bouguer riuscì ad eseguire misure di fattori di riflessione, su superficie lucide e su superficie diffondenti, e anche misure di fattori di trasmissione.

Più che altro quest'opera del Bouguer, per il nostro studio, ha un interesse di carattere filosofico. Perché nel secolo XVIII si ebbe una trasformazione lenta, ma progressiva, che allontanava sempre di più le menti degli scienziati dagli schemi del passato e vi ingenerava dei preconcetti falsi, ma da tutti presi per evidenti od indiscutibili.

Abbiamo già rilevato, nel Cap. III, che nell'ambiente scientifico anteriore al secolo XVIII era diffusa e chiaramente professata l'idea che vi era un agente esterno, promanante dal sole e dalle fiamme,

[16] Pierre Bouguer nacque nel 1698 a Croisic, Bretagna, e morì a Parigi nel 1758.

capace di eccitare la luce, quando colpiva gli occhi di un osservatore; ma era altrettanto chiara la convinzione che la luce fosse soltanto nell'« anima » ossia nella mente dell'osservatore. Anche a proposito del colore esisteva una distinzione analoga, per quanto meno esplicitamente professata, perché alle menti meno astratte sembrava troppo evidente che il colore fosse un qualche cosa localizzato alla superficie dei corpi colorati: quel tale qualche cosa che la luce pura, la luce bianca del Sole andava a prendere quando colpiva, illuminandoli, i corpi stessi, e portava poi con sé fino all'occhio dell'osservatore. Come abbiamo visto, è stata una delle conquiste più importanti di padre Grimaldi di aver dimostrato che il colore non era un'entità distinta dalla luce.

Come abbiamo già messo in evidenza, nei testi scientifici scritti in latino, allora lingua ufficiale e internazionale, la distinzione suddetta fra agente esterno, fisico ed effetto interno, psichico era espressa anche con la distinzione nella nomenclatura; *lumen* era il primo, *lux* il secondo. Tutti dicevano che il sole *illuminava* i corpi, e non esisteva la parola corrispondente con la radice della *lux*, perché tale parola non avrebbe avuto significato.

Questa distinzione, così chiara ed esplicita, era accettata da tutti anche nel secolo XVII. Galileo cita un paragone che non lascia dubbio sul suo modo di pensare a questo riguardo; infatti dice, parlando della luce, che se con un dito di una mano si titilla la punta del naso, egli sente solletico, ma non per questo può dedurne che il solletico era nel dito.

Anche Newton e Huyghens non avevano dubbi in proposito, e anzi si può dire che se sono sorte le teorie corpuscolari e ondulatorie circa la natura del *lumen*, lo si deve proprio alla chiara distinzione che il *lumen* non era la *lux*, ma poteva essere una qualunque cosa, che, agendo sulla retina dell'occhio provocava la visione della *lux*. Soltanto con questa premessa si poteva arrivare a concepire il *lumen* come costituito da uno sciame di particelle minutissime o come un treno d'onde. Perché se così non fosse stato, se cioè vi fosse stata la convinzione che la *lux* era esterna, e coincideva col *lumen*, il modello con cui questo veniva ad essere teoretizzato avrebbe dovuto essere luminoso e colorato. Ora non si vede come uno possa parlare di onde più chiare o più scure, di onde rosse e onde gialle.

Nella sua *Optice*, Newton, come abbiamo già riportato letteralmente nel Cap. V, si esprime molto chiaramente in proposito anche

per ciò che riguarda i colori. Ripetiamo le sue parole: « Quella luce omogenea, ossia quei raggi che mostrano il colore rosso, o che piuttosto fanno sì che i corpi osservati mostrino il colore rosso, li chiamo *rubrifici* o *rossi*; e quei raggi che fanno sì che i corpi osservati si vedano di colore giallo, verde, azzurro o violetto, li chiamo raggi *gialli, verdi, azzurri* o *violetti* ».

Ed insiste su questo punto spiegando che in essi raggi « non vi è altro che una certa attitudine o disposizione » atta a stimolare la *sensazione* di colore, come il moto di una campana o di una corda ci fa sentire il suono.

Ma poco per volta su questi chiarimenti si è finito per passarci sopra. Chi ben osservi le parole di Newton, vi vede un principio di slittamento. Quando ha scritto la prima frase, ha detto che i raggi li chiama *rubrifici* o *rossi*. Con la prima parola voleva mettere in evidenza che essi raggi non erano rossi, ma facevano vedere rosso: e ciò sarebbe stato chiarissimo. Però egli aggiunge che li chiama anche *rossi*, e giustifica così questa risoluzione [17]: « E ogni volta che sembri che io dica che il lume, o i raggi sono colorati o imbevuti di colore, vorrei che ciò fosse sempre detto in modo che non venga interpretato in senso filosofico e proprio, ma ad uso del volgo, cioè si accordi con le idee che le persone volgari usano rappresentarsi nell'animo, quando osservano esperimenti del genere. In realtà i raggi, se vogliamo parlare propriamente, non son ocolorati ». Però c'è da giurare che dopo questo chiarimento iniziale egli li ha sempre chiamati *rossi* e di raggi *rubrifici* non ne ha parlato più. Tanto è vero che subito dopo, quando parla dei raggi di altro colore non conia neppure le parole col suffisso *fici*, ma li chiama senz'altro *gialli, verdi, azzurri* o *violetti*.

Se un secolo dopo tutto il mondo dei fisici aveva dimenticato la riserva iniziale ed era pervaso dalla convinzione che i raggi fossero effettivamente rossi, gialli, verdi o violetti, non c'è da meravigliarsene. Un mondo di persone che tutto volevano isolare e localizzare all'esterno, che facevano di tutto per dimenticare che esiste una psiche e una personalità dell'osservatore, non domandava di

[17] Newton, *Optice*, Libro I, Parte II, « *Definitio*. ... Et quandocunque lumen, sive radios coloratos, vel coloribus imbutos dicere videar; id semper ita dictum velim, ut non philosophice et proprie, sed ad vulgum id dictum intelligatur; sive congruentur ideis istis, quas vulgus, cum huiusmodi experimenta videant, sibi animo fingere solent. Etenim radii, si proprie loqui velimus, non sunt colorati ».

meglio che scivolare in fondo alla china sul cui principio Newton aveva cominciato a slittare.

E non soltanto per il colore. Anche per la luce avvenne lo stesso. Tutta l'attenzione fu concentrata sul *lumen* e la *lux* fu dimenticata. Fino al punto che, decaduto il latino dalla funzione di lingua scientifica internazionale, nelle lingue moderne, usate anche per la letteratura scientifica si è usata una sola parola per indicare sia la luce sia il lume. In tutte le lingue moderne: *luce, lumière, light, luz, licht.*

La parola che già esisteva in queste lingue era quella di uso comune, cioè quella usata per indicare il contrario del *buio*, ossia la *luce che si vede*; quindi essa doveva servire per indicare ciò che nel linguaggio scientifico seicentesco era indicato con *lux*. Invece i fisici hanno adoperato quella parola per indicare il *lumen*.

Ciò ha contribuito non poco a infondere nella generalità dell'ambiente colto che non vi fosse ragione di distinguere la *lux* dal *lumen*, e che quindi la *luce* fosse un qualche cosa di obbiettivo, di fisico, di esterno all'osservatore. Convinzione quanto mai errata, e foriera di gravi errori e di equivoci senza fine: convinzione purtroppo diffusa anche oggi nella quasi totalità delle persone anche dell'ambiente colto in generale.

Era in corso avanzato questo processo di allontanamento dalle giuste concezioni del passato, quando il Bouguer pose le basi delle manipolazioni fotometriche. Ciò doveva portare ineluttabilmente al problema di « misurare la luce ». Nacque così la fotometria, cioè la scienza che doveva risolvere questo problema. Il suo sviluppo iniziale fu molto lento, perché fin dall'inizio gli sperimentatori urtarono contro difficoltà straordinarie. Era evidentemente la conseguenza inevitabile dell'equivoco fondamentale su cui era basato il loro lavoro: essi erano convinti di fare misure fisiche, mentre eseguivano esperienze psicologiche.

Il Bouguer indicò, involontariamente, qualche procedimento che dette l'illusione di ottenere risultati obbiettivi e che rafforzò quindi l'illusione di eseguire esperienze fisiche: tra l'altro il metodo delle « misure di zero » di cui abbiamo fatto cenno. Per altro, è anche da rilevarsi che le misure del Bouguer furono, fra le misure di natura fotometrica, quelle che presentano un carattere più spiccatamente fisico. Ma ormai la fotometria era indirizzata per questa via e doveva trovare, nel secolo successivo, dei cultori sempre più convinti di essere sulla via giusta.

Dobbiamo ora dare qualche notizia delle vicissitudini del « principio del Fermat », provocate dalla mentalità euforica del XVIII secolo. Riferendoci a ciò che è stato detto nel Capitolo IV a questo proposito, possiamo aggiungere che il Newton e più ancora i suoi seguaci misero una bella pietra su questa pericolosa idea del povero Fermat, ormai passato nel numero dei più; perché anche i newtoniani dovevano sostenere che la velocità della luce era maggiore nelle sostanze dense che in quelle rarefatte, e il loro duro compito non era certo agevolato dal ragionamento del Fermat.

Una prima ripresa dell'argomento vi fu da parte del Leibnitz, che nel 1682 pubblicò una nota sugli Atti di Lipsia, per esporre il modo cui egli pensava di conciliare la legge dell'economia naturale con quella della maggior velocità della luce nei mezzi più densi. Egli osserva che l'enunciato della prima legge non deve dire che la luce percorre il cammino più corto, né che essa percorre il cammino che richiede il minor tempo; bensì che « la luce segue il cammino più facile ». E per tale egli intende quello per cui è minimo il prodotto del percorso per la resistenza incontrata dalla luce nel mezzo.

Partendo da questa definizione coi metodi dell'analisi infinitesimale, di cui il Leibnitz era un fondatore (in concorrenza col Newton) egli ricava la solita legge del rapporto dei seni, per la rifrazione; ma per evitare che anche per questa via le cose finissero in accordo con le conclusioni del Fermat e non con quelle di Cartesio, il Leibnitz nientemeno considera la velocità di propagazione *proporzionale alla resistenza* che la luce incontra nel mezzo in cui procede. E giustifica questa posizione incredibile con un'analogia di questo genere: più stretto è il letto di un fiume, più veloce è l'acqua che si muove. Naturalmente la cosa fu messa a dormire.

Si occuparono ancora dell'argomento il Clairaut e il Mayran. Quest'ultimo nel 1723, in una Memoria letta all'Accademia delle Scienze di Parigi, rifà tutta la storia della polemica fra Descartes e Fermat, e mette in evidenza « l'imbarazzo e l'impotenza in cui ci si è trovati fin ora per metter d'accordo le leggi della rifrazione col principio metafisico » della massima economia della natura.

Prendiamo questa frase da una Memoria del Maupertuis [18], letta all'Accademia delle Scienze di Parigi nel 1744. Egli va a toccare

[18] Pierre Louis Morreau de Montepertuis nacque a St. Malo nel 1698 e morì a Basilea nel 1759.

questo punto delicato della teoria della luce perché ritiene di aver trovato « l'accordo di differenti leggi della natura che finora erano apparse incompatibili »: questo è infatti il titolo della Memoria. Le leggi erano quelle dell'economia massima dei fenomeni naturali, della costanza del rapporto dei seni nella rifrazione, e della maggior velocità della luce nei mezzi più densi.

Il Maupertuis non conosceva la Memoria del Leibnitz del 1682 su questo argomento e quindi rifà la storia del principio di Fermat, per rilevare che era troppo nebulosa l'enunciazione non essendo definito se si trattava del cammino più breve o del tempo più corto. Naturalmente egli trova che non si deve trattare del cammino più corto, perché non corrisponde alla legge sperimentale della rifrazione, e non si deve trattare del tempo più breve, perché ciò richiede che la velocità della luce sia minore nei mezzi più densi: ma aggiunge anche che una simile legge metafisica non deve essere così particolare. Egli dice:

> Meditando profondamente su questa materia, ho pensato che la luce, quando passa da un mezzo a un altro, abbandonando digià il cammino più corto, che è quello rettilineo, poteva ben anche non seguire quello del tempo più breve. Infatti quale preferenza dovrebbe avere qui il tempo sullo spazio? La luce, non potendo allora andar più per il cammino più corto, e per quello del tempo più breve, perché allora andrebbe per l'uno di questi cammini, piuttosto che per l'altro? Essa non segue nessuno dei due: prende una via che ha un vantaggio più reale: *il cammino che essa segue è quello per il quale è minima la quantità d'azione* [19].

E spiega subito che cosa intende per *quantità d'azione*. Per altro una esposizione del « principio generale » più completa e più precisa è data in una Memoria letta all'Accademia di Berlino due anni dopo, dal titolo *Recherches des lois du mouvement*: « Quando avviene qualche cambiamento in Natura, la quantità d'azione necessaria per questo cambiamento, è la più piccola che sia possibile ». E aggiunge: « La *quantità d'azione* è il prodotto della massa dei corpi per la loro velocità e per lo spazio che percorrono. Quando un corpo è trasportato da un punto ad un altro, l'azione è tanto più grande quanto più grande è la massa, più rapida la velocità, più lungo lo spazio per cui esso è trasportato » [20].

[19] *Oeuvres de Maupertuis*, Ed. Bruyset, Alyon 1768, vol. IV, p. 16.
[20] Ivi, p. 36.

Applicando il principio della quantità d'azione minima al caso della rifrazione, naturalmente senza tener conto della massa, che ora non ha importanza, trattandosi di un sol corpo, il Maupertuis, con la semplice applicazione del calcolo infinitesimale, ricava ancora la legge della costanza del rapporto dei seni, quando la velocità è maggiore nel mezzo in cui è minore l'angolo fatto dal raggio con la normale, cioè nel mezzo più denso.

Ecco dunque risolto l'enigma: la natura fa economia, e il newtonianesimo è in accordo con le leggi della natura.

Veramente di fronte a tutto questo complesso di tentativi c'è da restare ammirati e perplessi: ammirati di fronte alla capacità, alla sottigliezza e alla tenacia con cui questi pensatori hanno battuto e battuto contro le muraglie del mistero per tentare di farvi una breccia; perplessi di fronte alla elasticità delle cosiddette *scienze esatte*, in cui con le leggi ferree della logica e col meccanismo infallibile della matematica si arriva a conclusioni diametralmente opposte.

Il ragionamento del Maupertuis, che a lui e a chi lo ascoltava apparve un capolavoro di genialità e rettitudine, oggi giace sepolto sotto una coltre di oblio, benevola coltre che risparmia all'autore la taccia di un errore. Questa benevolenza dei posteri non è molto generosa: perché toglie alla memoria del Maupertuis anche un onore: quello di aver definito il concetto di *azione*, di cui oggi si fa larghissimo uso. Infatti la costante di Planck, h, che è il *quanto d'azione* ha le dimensioni del prodotto di una massa, di una velocità e di uno spazio, proprio come aveva definito il Maupertuis. Gli errori cadono; quel che conta è quello che rimane.

Tutto questo dibattersi, sterile e inconclusivo, è stato rievocato a questo punto, come si è detto, per dimostrare la mentalità euforica ed illusa del secolo XVIII, a proposito della luce. Ma ormai siamo giunti agli albori del secolo decimonono e la nostra storia dovrà registrare un'altra evoluzione di interesse particolare.

Capitolo settimo

IL TRIONFO DELL'OTTICA ONDULATORIA

Quale era ai primi dell'800 il pensiero dei seguaci della teoria corpuscolare risulta bene dalle parole con le quali E. L. Malus [1] inizia la sua memoria sulla *Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallisées*, memoria premiata dall'Accademia di Francia nel gennaio 1810:

I fenomeni dell'ottica hanno il vantaggio particolare di poter essere misurati con grande precisione e di essere collegati da un piccolo numero di leggi matematiche. Queste leggi sono indipendenti dalle ipotesi che si possono fare sulla natura della luce; perché sia che si supponga con Newton che essa consista in un fluido molto rarefatto, lanciato da tutte le parti dai corpi luminosi, sia che si supponga con Huyghens che essa è prodotta dalle ondulazioni di un fluido etereo, il cammino dei raggi è sempre lo stesso. L'ipotesi di Huyghens è soggetta a grandi difficoltà; essa sembra anche incompatibile coi fenomeni chimici prodotti dalla luce; quella dell'emissione è più verosimile e concorda meglio con le nostre conoscenze fisiche. Io adotto dunque in quest'opera l'opinione di Newton, non come una verità indiscutibile, ma come un mezzo per fissare le idee e per interpretare le operazioni dell'analisi. È una semplice ipotesi, che d'altra parte non ha nessuna influenza sui risultati del calcolo.

Trattamento più umiliante la teoria dell'emissione non lo poteva avere; vecchia di oltre un secolo, senza rivali pericolose, essa è

[1] Etienne Louis Malus nacque a Parigi nel 1775 e vi morì nel 1812. Quando scrisse la Memoria premiata dall'Accademia di Francia aveva 35 anni ed era tenente colonnello del Corpo Imperiale del Genio. Morì, appena trentasettenne, due anni dopo.

trattata non da un avversario, ma da un seguace, come un ripiego, come un modo di dire, « non comme une vérité incontestable! ».

Malus aveva intrapreso gli studi sulla birifrangenza, per concorrere al premio che l'Accademia di Francia aveva bandito nel 1808 col tema seguente: « Dare della doppia rifrazione che la luce subisce nel traversare diverse sostanze cristallizzate, una teoria matematica verificata dall'esperienza ».

Il fatto stesso che questo tema era stato posto sta a dimostrare che l'Accademia non era soddisfatta delle idee correnti sull'argomento. Il Malus nel 1810 ebbe il premio e la sua memoria fu pubblicata col titolo che abbiamo riportato sopra. Però in essa più che la teoria della doppia rifrazione, è degna di nota una scoperta, nota tutt'ora col nome di *esperienza di Malus*: per dare a un fascio di luce quel tale stato caratteristico e misterioso per cui attraversando un cristallo di spato d'Islanda, in certi orientamenti non si ha più scomposizione in due fasci, non è necessario (come si credeva fino ad allora) che la luce stessa abbia attraversato prima un altro cristallo di spato o comunque birifrangente: ma basta che abbia subìto una riflessione!

Malus si esprime molto chiaramente nella sua Memoria: « In base alle esperienze che ho descritto, il carattere che distingue la luce diretta (quella che oggi si chiama *naturale*) da quella che è stata sottoposta all'azione di un cristallo, consiste in questo: che la prima può sempre esser divisa in due fasci mentre che nell'altra questa facoltà dipende dall'angolo compreso fra le sezioni principali dei due cristalli » [2].

Qualche pagina dopo continua:

Quando un fascio di luce attraversa una sostanza diafana, una parte dei raggi viene riflessa dalla superficie rifrangente, e un'altra parte dalla superficie di emergenza. La causa di questa riflessione parziale fin qui è sfuggita alle ricerche dei fisici. Ci se n'è occupati raramente, e non si è neppure cercato di studiare le modificazioni di questo fenomeno singolare, che sembra fare eccezione alle leggi generali della rifrazione, e che è altrettanto strano quanto quello della duplicazione delle immagini. Noi vedremo tuttavia che fra queste due specie di fenomeni esiste un legame stretto, e che sotto certi rapporti si possono riguardare come di-

[2] E. L. Malus, *Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallisées*, Baudouin, Parigi 1810, paragrafo 48, p. 219.

pendenti da una stessa causa, poiché presentano degli effetti identici.

Cominceremo dall'esempio più semplice e dalla esperienza più facile a verificarsi.

Se si fa cadere un fascio di luce sulla superficie dell'acqua stagnante, e sotto l'angolo di 52 gradi e 54 primi con la verticale, la luce riflessa ha tutti i caratteri di uno dei fasci prodotti dalla doppia rifrazione di un cristallo [3].

Ecco la scoperta di Malus. Egli, da... buon seguace della teoria emissionistica, era andato a stuzzicare uno dei vespai più virulenti, sul quale era stata posta prudentemente una pietra da tutti i fisici del secolo decimottavo; risolleva la questione e la complica in modo imprevedibile. Non solo non si capiva il perché di questa riflessione parziale, ma ora la luce riflessa risultava addirittura modificata come quella della birifrangenza: « In generale, in tutti i fenomeni di questo genere » conclude Malus « il piano di riflessione rimpiazza il piano della sezione principale del primo cristallo ». E questo avviene quando la sostanza riflettente è diafana; perché la riflessione sui metalli lucidati complica ancora molto di più le idee.

Però Malus riesce a dimostrare che la teoria dell'emissione potrebbe spiegar bene questi fenomeni, ammettendo l'idea appena accennata da Newton nella « XXVI Quaestio » che i corpuscoli di luce abbiano delle asimmetrie congenite, e che in generale queste siano orientate in tutte le guise in uno sciame di luce naturale, ma che debbano subire un allineamento e un ordinamento nell'attraversare i cristalli birifrangenti. Per analogia ai corpi magnetici, Malus dice muniti di *poli* i corpuscoli di lume e chiama *polarizzata* la luce che ha queste particelle tutte orientate uniformemente. Questi termini si usano ancor oggi.

Egli pertanto trova che non vi è difficoltà ad ammettere una azione polarizzante nella riflessione, in quanto la superficie riflettente avrebbe il compito di orientare questi bipoli corpuscolari. Al tempo stesso giudica la sua scoperta inconciliabile con le idee di Huyghens ancor più dei fenomeni noti fino ad allora [4]

« Infatti » aggiunge « se i semplici fenomeni della riflessione sono differenti per uno stesso angolo d'incidenza, cosa che non

[3] Ivi, paragrafo 49, p. 221.

[4] « Les observations que j'ai rapportées (51) (52) sont encore bien plus contraires à cette hypothèse que celles qu'on connoissait alors » (ivi, paragrafo 54, p. 239).

può aver luogo nel sistema delle onde, bisogna necessariamente concluderne non solo che la luce è una sostanza sottoposta alle forze che animano gli altri corpi, ma anche che la forma e la disposizione delle sue molecole hanno una grande influenza sui fenomeni ».

Egli afferma questo dopo aver ricordato che Huyghens aveva riconosciuto, lui stesso, che la sua ipotesi non arrivava a spiegare i fenomeni presentati dalla luce già scissa per doppia rifrazione, quando attraversava un secondo cristallo.

Quante volte gli avversari non hanno rinfacciato a Huyghens questo riconoscimento! Newton ha fatto tesoro dell'ammaestramento e si è guardato bene dal riconoscere i punti deboli delle sue concezioni; e sì che avrebbe avuto assai più ragione di Huyghens di farlo; mentre questi avrebbe fatto meglio a lasciare ai posteri il compito di spiegare il mistero, e non negarne la possibilità. Infatti i posteri il mistero di Huyghens l'hanno spiegato; quelli di Newton no.

Ma ormai la teoria corpuscolare stava per chiudere la sua vita, dovuta soltanto alla mancanza di una teoria diversa. Le discussioni e gli studi del secolo decimottavo avevano fatto maturare le idee. Eulero aveva ripreso la teoria ondulatoria, vi aveva inserito esplicitamente il concetto già affacciato da padre Grimaldi, che i colori fossero dovuti alla diversa lunghezza d'onda delle ondulazioni. Eulero aveva anche studiato la propagazione delle onde nei corpi diafani, ma le sue idee non ressero alla critica, perché peccavano di troppa materialità. Tutto ciò per altro ebbe il merito di far discutere e di preparare il terreno per i successori.

Un progresso reale, un vero colpo di scena fu provocato dalle idee geniali di due giovani completamente estranei all'ambiente accademico: un medico inglese e un francese ingegnere di ponti e strade: Tommaso Young e Agostino Fresnel. Per merito delle *stravaganze* di questi due intrusi, nel breve volger di due o tre lustri la teoria dell'emissione passò nel novero dei ricordi storici e la teoria ondulatoria salì al grado di concezione basilare della fisica dell'800.

Un caso curioso è quello del titolo della XXII Proposizione del *De Lumine* di padre Grimaldi: « La luce talvolta col suo intervento rende più oscura una superficie da altra parte e precedentemente

illuminata » [5]. Il fenomeno oggi è notissimo e può essere espresso proprio con la dicitura composta da padre Grimaldi; ma l'esperienza come la descrive l'autore non dà certamente quello che oggi si intende col nome di « interferenza della luce ». Egli faceva sovrapporre due coni di luce ottenuti facendo entrare la luce del Sole attraverso due forellini minuti in una stanza oscura, e osservando sopra uno schermo bianco a una distanza tale da questi fori che le due sezioni circolari si sovrapponessero un pochino. In queste condizioni ed in altre affini (per esempio, facendo entrare la luce da due parti comunque disposte e poi portando a sovrapporsi i fasci mediante uno specchio) egli osserva che l'orlo della zona ove i due fasci si sovrappongono è meno chiaro che la superficie illuminata da uno solo dei fasci stessi.

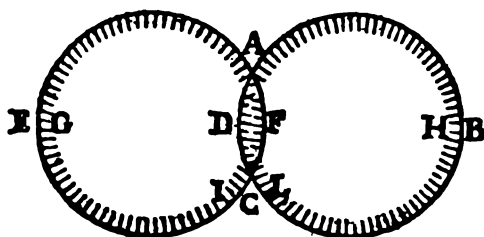



Fig. 32 - La posizione delle sezioni di due coni di luce solare, in cui padre Grimaldi dice di aver notato che la sovrapposizione di luce a luce produce una certa oscurità (dal *De Lumine* di p. Grimaldi, Bologna 1665, p. 187).

Evidentemente in queste condizioni è impossibile che si sia verificato un fenomeno d'interferenza nel senso ordinario della parola, sia per le modalità dell'esperienza, sia per ciò che l'autore riferisce di aver osservato. Infatti perché le interferenze siano visibili nelle condizioni in cui padre Grimaldi fa intendere di avere operato sarebbe stata necessaria una sorgente sottile di pochi secondi di ampiezza, invece del Sole che è di ben 32 primi. Probabilmente l'effetto descritto è dovuto alla diffrazione e un po' al contrasto delle varie zone illuminate. Del resto l'autore termina la Proposi-

[5] « Propositio XXII: Lumen aliquando per sui communicationem reddit obscuriorem superficiem corporis aliunde, ac prius illustratam » (padre Grimaldi, *op. cit.*, p. 187).

zione dichiarando che « la cosa era affidata alla abilità dello sperimentatore e alla bontà dell'occhio osservatore » [6].

Tuttavia è strana la circostanza che 140 anni più tardi un dispositivo molto vicino a quello descritto da padre Grimaldi servì a Tommaso Young proprio per dimostrare che la luce aggiunta alla luce poteva oscurare invece di illuminare di più.

Tommaso Young [7], di animo ribelle ad ogni dogmatismo, amante del nuovo e dell'imprevisto, non era ancora trentenne, quando, probabilmente nel corso degli studi di medicina, fu portato a considerare l'argomento della visione e il problema della natura della luce. Egli non restò certo soddisfatto di fronte al ripiego delle « vices » per spiegare gli anelli di Newton, tanto più che nel frattempo un secolo e mezzo di critica degli avversari e dei seguaci non aveva fatto progredire di un passo la teoria, e ne aveva invece messo in chiaro tutta l'insufficienza. Bisognava escogitare un meccanismo nuovo per rappresentare questo fenomeno.

Di fronte ad una lamina sottile di spessore variabile con continuità, in cui si vedevano zone luminose e zone scure alternarsi regolarmente, Newton fu portato dalle idee dominanti nella sua mente a vedervi una riflessione e una trasmissione privilegiate alternativamente, e in questo gli fu certo di conforto l'osservare che le frange per trasparenza sono complementari di quelle per riflessione. Egli capì che era necessaria anche la seconda: alla prima attribuì il compito di eccitare la periodicità nelle « vices » dei corpuscoli luminosi e alla seconda quella di analizzarle. Così arrivò al contenuto della famosa XII Proposizione della II Parte del II Libro dell'*Optice*. Poi, la riflessione parziale sulle superficie diafane, il famigerato fenomeno che sembrava fatto apposta per minare le teorie della luce, lo obbligava a ritoccare il suo modello degli accessi; e allora non si capisce più che funzione avesse la prima superficie della lamina sottile. Si capisce soltanto che la sola maniera di vederci chiaro in tutta la faccenda era quella di chiudere gli occhi.

Young non li ha voluti chiudere, e di fronte alla lamina con le frange ha avuto il lampo di genio di considerare come essenziale

[6] « Res posita est in dexteritate experientis, et in sanitate oculi spectatoris,... » (ivi, p. 190).

[7] Nacque nel 1773 a Milverton (Somersetshire, Inghilterra) e morì a Londra nel 1829. Si laureò in medicina a Gottinga nel 1795.

per la formazione delle frange stesse la riflessione parziale della luce sulla prima e sulla seconda faccia, e ha pensato che la luce riflessa dalla seconda superficie doveva sommarsi a quella riflessa dalla prima. Ora il fatto che ci sono delle zone nere, in cui non c'è neppure la luce riflessa dalla prima faccia portava a concludere che là le due luci si dovevano distruggere, mentre dove le zone erano chiare si dovevano rinforzare. Newton non aveva messo in evidenza che secondo il meccanismo degli accessi le frange non potevano essere *nere* non solo per trasparenza, ma neppure per riflessione, perché in ogni caso la luce riflessa dalla prima faccia della lamina sottile ci doveva essere sempre [8]!

E così Young in una nota pubblicata nelle « Philosophical Transactions » del 1802, col titolo *An Account of some cases of the Productions of Colours, not hitherto described*, scriveva di avere scoperto una legge atta a spiegare dei fenomeni altrimenti « insulated and inintelligible ». Ecco le sue parole:

La legge è che quando due porzioni della stessa luce arrivano all'occhio per vie diverse, o esattamente o molto prossimamente nella medesima direzione, la luce diviene intensa al massimo quando la differenza dei cammini è un multiplo di una certa lunghezza, e intensa al minimo nello stato intermedio delle porzioni interferenti; e questa lunghezza è differente per luce di differenti colori [9].

Nel 1804, sullo stesso periodico, sotto il titolo *Experiments and calculations relative to physical Optics* riporta varie esperienze di diffrazione, e confrontandole con quelle di Newton, ne conclude:

Dalle esperienze e dai calcoli che abbiamo premesso, ci è lecito indurre che la luce omogenea, a certe distanze uguali nella direzione del suo moto possiede qualità opposte, capaci di neutralizzarsi o di distruggersi a vicenda, e di estinguere la luce quando avviene che si uniscano; e che queste qualità si succedono alternativamente in superficie sferiche

[8] L'osservazione però fu fatta da Fresnel nel *Complemento alla prima memoria sulla diffrazione*, « Opere complete », 1846, p. 52.

[9] « The law is, that wherever two portions of the same light arrive at the eye by different routes, either exactly or very nearly in the same direction, the light becomes most intense when the difference of the routes is any multiple of a certain length, and least intense in the intermediate state of the interfering portions; and this length is different for light of different colours » (T. Young, nota in « Philosophical Transactions », 1802, p. 387).

successive e concentriche a distanze che sono costanti per la stessa luce attraversante lo stesso mezzo [10].

Egli continua facendo notare come con questa legge si spiegano bene le frange e i colori delle lamine sottili; e siccome Newton aveva osservato che sostituendo l'acqua all'aria in una lamina sottile, gli anelli si restringevano, Young, ritenendo che il numero di periodicità « dovesse restare necessariamente inalterato in una data quantità di luce » conclude che la velocità di propagazione della luce stessa deve diminuire nei mezzi più densi. E siccome il suono si comporta in modo analogo, conclude che « vi deve essere una qualche stretta rassomiglianza tra la natura del suono e quella della luce ».

Quante volte in ventitré secoli non è stato ripetuto che fra la natura del suono e quella della luce vi deve essere una stretta analogia! Eppure ancora questo si dice, ma non convince.

Young aveva discusso come argomento di tesi di laurea la produzione della voce umana; ciò gli era servito ad acquistare una conoscenza profonda delle leggi del suono e della propagazione delle onde. Egli conosceva bene l'opera di Newton e quella del Boscovich; questa deve aver avuto su di lui una influenza notevole, perché aveva abbattuto il preconcetto della propagazione rettilinea della luce e aveva cominciato ad accennare che fra le varie cause per cui la luce non andava in linea retta era da annoverarsi la diffrazione.

Con queste premesse egli attaccò la teoria della emissione e ne fece una critica serrata a proposito della diffrazione, rilevando fra l'altro quello che padre Grimaldi aveva già dimostrato e che Newton doveva naturalmente conoscere: che le frange di diffrazione erano indipendenti dalla maggiore o minor acuminatezza dello spigolo diffrangente e dalla materia dello spigolo stesso. Su queste circostanze non solo Newton aveva messo una pietra sopra, ma con lui anche tutti coloro che si ostinavano a parlare di « inflessione » della luce.

Young ritirò a galla l'argomento, e fece un'esperienza nuova: realizzate le condizioni per ottenere le frange luminose nella parte

[10] T. Young, The Bakerian Lecture, « Phil. Trans. », 1804, p. 11.

oscura dell'ombra di un filo, mostrò che esse frange sparivano tutte se si ostruiva con uno schermo opaco la luce che lambiva *uno solo* dei due orli del filo: ciò che dimostrava che per la formazione di tali frange era necessaria la luce proveniente *da una parte e dall'altra* del filo stesso. Ed infine mise in evidenza che la propagazione rettilinea della luce, su cui faceva tanto affidamento la teoria dell'emissione, tutto sommato non esisteva, perché la luce girava intorno agli ostacoli, come dimostrava appunto la diffrazione.

Tutte queste considerazioni, e altre ancora che abbiamo avuto già occasione di richiamare, relativamente alla trasparenza, alla velocità costante (il Laplace [11], che pure lui era un seguace della teoria della emissione, aveva dimostrato che una stella 250 volte più grande del Sole sarebbe rimasta invisibile, perché la luce non ne sarebbe potuta uscire, e anche le stelle un po' inferiori a queste giganti avrebbero dovuto emettere luce con velocità diversa a seconda della propria massa) portano Young a dichiararsi favorevole alla teoria ondulatoria, a riprendere le idee di Huyghens e a farne la base per la spiegazione dei fenomeni fondamentali dell'ottica.

Completò la sua opera con una esperienza che è rimasta celebre e che porta ancora il suo nome: facendo passare la luce di una sorgente puntiforme attraverso a due forellini minuti e vicini (come appunto padre Grimaldi aveva fatto col Sole), questi vengono a funzionare come due sorgenti di luce coerente, e danno luogo a dei coni divergenti per diffrazione: dove questi coni si sovrappongono si formano delle frange d'interferenza, obbedienti a quella tale legge che egli aveva formulato e chiamato appunto « legge d'interferenza ». Egli eseguì delle misure e ne dedusse la periodicità della luce dei vari colori: 1/36.000 di pollice (=7 decimi di micron) per il rosso e 1/60.000 (=4,2 decimi di micron) per il violetto.

In tre anni tutto questo. Ma, come era inevitabile, accanto a tante cose magnifiche ci furono non pochi errori. Intanto egli, troppo convinto della sua legge d'interferenza, ne abusò a proposito della diffrazione; perché se è assai ragionevole considerare come fenomeni semplici d'interferenza, cioè dovuti alla semplice sovrapposizione di due fasci di luce le frange chiare nella zona d'ombra

[11] Pierre Simon Laplace nacque nel 1749 a Beaumont-en-Auge e morì a Parigi nel 1827.

dietro un filo (e Young fece la prova convincente che abbiamo già riferito), non è altrettanto chiaro spiegare le frange scure, descritte da padre Grimaldi, da Newton e da tanti altri, nella parte illuminata intorno all'ombra. Young vi volle vedere un'interferenza tra la luce diretta e quella riflessa dalla superficie dello spigolo; e naturalmente si espose a un insuccesso: già padre Grimaldi aveva dimostrato che questa luce riflessa non c'entrava!

La maniera così, se vogliamo, geniale, ma non sistematica, non ordinata, non precisa con cui egli si esprime gli attirò addosso le critiche dei contemporanei; per vincere l'opinione generale, che è fatta per « sentito dire » e per fiducia, ci vogliono altri mezzi. Ne abbiamo già parlato nelle pagine precedenti. E Young non affrontò col metodo necessario questa enorme massa inerte che è l'opinione generale: vi si slanciò contro la veemenza del giovane entusiasta, e fu trattato male. Sono passate alla storia le insolenze volgari che pubblicamente gli propinò Lord Brougham, sulla « Edimburgh Review ». Young ne rimase colpito e annichilito. Egli scrisse un articolo apologetico, che non fu accolto da alcun periodico, e che egli pubblicò per conto suo sotto forma di opuscolo, e lo pose in vendita. La grossa accusa che gli era stata fatta era di aver criticato duramente le idee e gli esperimenti di Newton, mettendone in evidenza dei « presunti » errori, che certamente il divino Newton non aveva commesso. Newton doveva avere ragione. Young nella sua replica dimostra che egli non aveva mai dubitato della grande sapienza di Newton e che ne aveva ammirato sempre il grande ingegno e le grandi scoperte fatte; « But », aggiunge « much as I venerate the name of Newton, I am not therefore obliged to believe that he was infallible ». Perciò ritiene che non vi sia niente di male a mettere in evidenza i punti nei quali i ragionamenti di Newton non quadrano bene e a proporre una teoria che spieghi facilmente e completamente e anche organicamente tanti fenomeni che i newtoniani avevano volutamente lasciato nell'ombra.

Questa replica, che si trova riprodotta nelle *Miscellaneous Works of the late Thomas Young*, pubblicate a Londra nel 1855 (Ed. John Murray) è chiusa da una nota dell'Editor, George Peacock: « Of the preceding most masterly Reply, which was published in the form of pamphlet, it was stated by its author, that, *one copy only was sold*; it consequently produced no effect in vindicating his scientific character, or in turning the current public opinion in favour

of his theory » [12]. A tal livello era arrivato il dogmatismo newtoniano.

Ma ormai le idee dello Young erano state lanciate.

Quelle di Newton, coperte di onori, dopo un secolo e mezzo di infecondità stavano per morire. Quelle di Young, coperte di insulti, dopo dieci anni dovevano dare dei frutti meravigliosi. E ciò fu per opera di quell'ingegnere di ponti e strade che rispondeva al nome di Agostino Fresnel [13].

Compiuti gli studi all'Ecole Polytechnique di Parigi, egli non ancora ventenne si impiegò nella Francia meridionale in un cantiere stradale e vi passò un paio di lustri. In questo ambiente, molto pratico, non perse mai di vista alcune questioni di scienza molto elevata, di cui evidentemente aveva avuto sentore nelle lezioni ricevute a Parigi, e come sollievo delle innumerevoli beghe giornaliere, rivolgeva la mente alle teorie sulla natura della luce. Spesso nei suoi quaderni di lavoro, accanto alle note di paga degli operai comparivano schemi e considerazioni sulla luce e su questioni affini. Alla fine si decise a scrivere una Memoria che intitolò *Sogni* (*Rêveries*) e la mandò ad Ampére. Che cosa contenesse non si sa, ed egli poi l'ha completamente dimenticata.

Si può arguire, dal come si è comportato negli anni successivi, che egli la teoria dei newtoniani non la potesse digerire. In quegli anni di isolamento scientifico egli si formò la convinzione che la luce non poteva esser fatta di corpuscoli materiali e che bisognava ritornare alle onde. Era un modo di pensare dettato dal buon senso, perché Fresnel non aveva certo maniera di sviscerare la questione come avrebbe potuto fare se si fosse trovato nell'ambiente degli studi.

Quanto fosse scarsa la sua preparazione culturale in questo campo delle scienze è dimostrato dal seguente brano di una lettera scritta il 15 maggio 1814 al fratello Léonor, a Parigi; dopo avergli richiesto una copia della *Fisica* dell'Haüy aggiunge: « Vorrei avere anche qualche memoria che mi mettesse al corrente delle scoperte dei fisici francesi sulla polarizzazione della luce. Ho visto nel « Monitore » qualche mese fa, che Biot aveva letto all'Istituto una me-

[12] *Miscellaneous Works of the late Thomas Young*, Editor George Peacock, John Murray, London 1855, vol. I, p. 215.

[13] Augustin Jean Fresnel nacque a Broglie, Dipartimento dell'Eure, nel 1788, e morì a Ville-d'Avray, presso Parigi, nel 1827.

moria molto interessante sulla polarizzazione della luce. Ho un bel rompermi la testa, ma non indovino che cosa sia ».

Poco meno di un anno dopo, nell'aprile del 1815 gli eventi politici cambiarono il corso delle cose: il giovine ingegnere che si era schierato apertamente contro Napoleone, reduce dall'isola d'Elba, fu destituito dal suo impiego e fu confinato per misure di alta polizia, a Mathieu, presso Caën. Confinato in un piccolo paesino, ma libero da questioni direttive e tecniche, si occupa a fondo dei suoi « sogni » prediletti; ed entra in relazione epistolare con Arago [14], astronomo dell'Osservatorio di Parigi. Non è privo di interesse che questi, di due anni appena più anziano di Fresnel, fosse allora un giovinotto, neppure trentenne. Per quanto ricoprisse un posto dei più ambiti (era anche accademico) aveva attraversato dei periodi avventurosi e burrascosissimi: non poteva avere una cultura profonda e delle idee troppo fatte. E questa fu la fortuna di Fresnel. Young, che aveva detto delle cose giustissime, trovò un Lord Brougham che lo annichilì; Fresnel, che, come vedremo, cominciò molto zoppicante, trovò un Arago che lo lanciò e lo sostenne.

Dunque Fresnel nel luglio del 1815 scrisse ad Arago per domandargli delle indicazioni e dei consigli sulle teorie della luce, e Arago gli rispose: legga il Grimaldi, il Newton, il trattato inglese del Jordan e le memorie di Lord Brougham e di Young. Ma Fresnel non sapeva l'inglese e probabilmente neppure il latino (che ormai era in decadenza come lingua scientifica) e non aveva letto nulla di tutto ciò. Invece si mise a fare delle misure, e il 15 ottobre del 1815 inviò all'Accademia di Francia la sua prima memoria, dal titolo *La diffraction de la lumière.*

Già la prima parola è un programma: non più inflessione, ma diffrazione.

La memoria comincia con un tentativo di demolire la teoria dell'emissione. Il primo argomento è del tutto nuovo: luce e calore debbono essere della stessa natura, perché un corpo nero illuminato si riscalda e un corpo caldissimo emette luce. Ora gli spazi interplanetari sono occupati dal calore; se questo è un insieme di corpuscoli, come è possibile che la luce del Sole arrivi a noi con la

[14] Dominique François Jean Arago nacque a Estagel (Perpignano) nel 1786 e morì a Parigi nel 1853.

sua solita velocità, se per via deve aver incontrato « tanti miliardi » di corpuscoli calorici?

D'altra parte il calore passa dall'aria in un corpo più freddo, ma poi si arriva alla saturazione e all'equilibrio; perché questo non si verifica per la luce?

Qualche altra considerazione circa la visione, la stranezza degli « accessi » di buona memoria, e dei « poli » delle particelle costituenti la luce, completa la prima critica di Fresnel verso la teoria dell'emissione: critica, come si vede, molto discutibile.

Ma poi Fresnel continua: « mi sembra che il modello vibratorio si presti meglio a spiegare il complesso andamento dei fenomeni luminosi; e siccome allora riappare l'analogia col suono, e la solita obbiezione che le onde girano intorno agli ostacoli, ho voluto studiare le ombre ». E naturalmente ha finito con l'osservare le frange di diffrazione. Come padre Grimaldi e come Newton. Ma mentre questi due volevano ad ogni costo vedervi le particelle che deviavano dalla loro via rettilinea, Fresnel vuole concludere che di particelle non ve ne dovevano essere. Era una posizione nettamente nuova.

Si è messo a far le osservazioni e le misure con dei mezzi rudimentali (racconta di essersi fatto fare dal fabbro del villaggio il micrometro con cui eseguì le prime misure), e ciò nonostante ha visto e ha trovato tante cose che i suoi predecessori non avevano mai visto. Si è trattato di un particolare operativo che ha voluto dir molto: si può dire che è stato come l'origine di tutta l'opera di Fresnel. Perché per osservare le frange di diffrazione ci vogliono delle sorgenti sottilissime, e quindi di intensità ridottissima. A quell'epoca bisognava usare la luce del Sole, se si voleva vedere qualche cosa. Ora, tutti i predecessori di Fresnel, in queste osservazioni, usavano fare un foro in un'imposta di una stanza buia (proprio come aveva descritto padre Grimaldi) e raccogliere il cono luminoso su uno schermo di carta bianca o sopra un vetro spulito: per via interponevano l'oggetto diffrangente (fori, fessure, orli, fili, etc.) e osservavano sullo schermo gli effetti.

Fresnel, invece, ha voluto vederci bene, e ha usato una lente d'ingrandimento: ciò l'ha portato, per non ostruire con la testa il passaggio della luce, a usare un vetro smerigliato, invece di uno schermo di carta; e infine, cosa più importante, ha levato lo schermo, e ha ricevuto direttamente sulla lente e attraverso questa nell'occhio, i fasci luminosi.

Egli stesso racconta che durante una osservazione, il vetro smerigliato su cui osservava, essendo stato fissato male, si abbassò, in modo che metà del campo ne rimase priva; egli osservò con sorpresa che in quella metà senza vetro le frange erano visibili molto meglio che sul vetro, e, di conseguenza, da allora in poi lo eliminò del tutto. Un piccolo incidente sperimentale, che, osservato al momento giusto, ha costituito per il Fresnel, una fortuna vera. Ciò gli ha permesso di perfezionare le operazioni in modo superlativo. Soltanto da qualche anno, da quando si sono affermati i concetti energetici della risoluzione ottica, si è apprezzato in pieno il grande passo compiuto con questa variante sperimentale apparentemente così modesta.

In questo modo infatti Fresnel ha avuto a disposizione un flusso luminoso enormemente superiore, e ciò gli ha permesso di ridurre piccolissime le dimensioni della sorgente luminosa: invece di un foro nella parete della stanza, ha usato una gocciola di miele fissata in un foro di una lamina metallica: cioè una lentina di una distanza focale minima, che dava del Sole un'immagine microscopica.

Inoltre ciò gli ha permesso di usare un oculare con micrometro a fili; e se anche questo era stato costruito dal fabbro del villaggio, già permetteva di fare misure al centesimo di mm, cosa che nessuno prima aveva potuto fare.

Infine il nuovo sistema di osservazione gli permetteva di andare ad osservare come nascevano le frange sull'orlo degli ostacoli diffrangenti; e anche questo nessuno l'aveva mai guardato. Perché Fresnel, appunto, aveva messo sotto processo l'inflessione, e la voleva seguire nel suo processo formativo. E in questo modo trovò che le frange « esterne » nascevano tutte insieme proprio sull'orlo dell'ostacolo.

Per chiarire meglio ai lettori non molto familiarizzati con questi fenomeni, il decorso degli studi di Fresnel, è opportuno ricordare che l'ombra di un filo assai sottile (fino a qualche mm di diametro, di solito) illuminato da una sorgente sottilissima, non è un rettangolo a orli netti, ma ha una struttura assai complessa: si vedono nell'interno dell'ombra tante frange parallele agli orli ed equidistanti tra loro; ed anche all'esterno, altre frange pure parallele agli orli, ma di larghezza degradante e di tenue contrasto.

Il Fresnel dunque osservò con una lente di ingrandimento molto forte le figure come quella riportata, in piani sempre più vicini al

filo e infine anche sul filo stesso, e così vide che le frange esterne si ravvicinavano sempre più fra loro e finivano tutte sull'orlo diffrangente. Già questa era una constatazione che dava molta noia alla teoria dell'inflessione: basta ritornare alle figg. 24 e 25 per vedere che la teoria newtoniana prevedeva un decorso ben diverso delle cose vicino agli orli diffrangenti.

Il Fresnel allora fa delle misure: in ogni piano misura la distanza delle frange (sempre quelle esterne) dall'orlo dell'ombra calcolata geometricamente e trova che « la medesima frangia non si propaga in linea retta, ma secondo un'iperbole, di cui i fuochi sono il punto luminoso e uno degli orli del filo ». Questo linguaggio matematicamente un po' strano va interpretato considerando il fenomeno in una sezione fatta con un piano perpendicolare al filo.

Ora le misure, specie fatte col micrometro del fabbro, non davano una conclusione così netta: essa era stata ricostruita dal Fresnel, che, una volta supposta tale forma iperbolica, aveva poi trovato che gli scarti tra i numeri calcolati e le osservazioni erano inferiori agli errori di osservazione (errori che non superavano il 7%). Ed egli aveva indicato l'iperbole suddetta, perché quella corrispondeva alle interferenze fra le onde sferiche « dirette », cioè emesse dal punto luminoso, e delle onde pure sferiche emesse dall'orlo dell'ostacolo. La fig. 33 esprime chiaramente questo concetto.

Con la stessa regola egli spiega anche la formazione delle frange « interne » con un accordo ottimo fra misure e calcoli: e che esse siano formate dal concorso della luce proveniente dalle due parti del filo egli lo prova ostruendo un lato con un piccolo foglio di carta.

C'è un solo punto di netto disaccordo tra i calcoli e le osservazioni: i calcoli danno per le frange chiare quello che l'osservazione dà per quelle scure. Fresnel spiega, provvisoriamente, il fatto ammettendo che i raggi riflessi dall'orlo dell'ostacolo perdano nella riflessione una mezza lunghezza d'onda.

Convinto così che il decorso dell'esperienza fosse nettamente in contrasto con la teoria corpuscolare e decisamente d'accordo con quella ondulatoria, egli manda la nota all'Accademia delle Scienze. Qualche giorno dopo scrive anche direttamente ad Arago chiedendogli il suo giudizio, e prospettandogli ulteriori sviluppi, che si propone di esporre in una memoria supplementare.

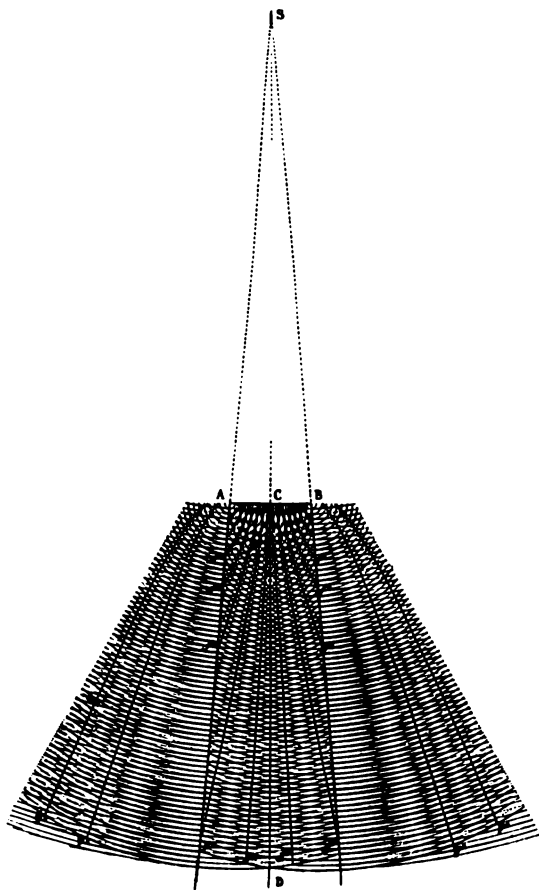



Fig. 33 - Schema geometrico con cui Fresnel dette la prima spiegazione delle frange di diffrazione nell'ombra di un filo. La figura rappresenta il fenomeno in una sezione piana perpendicolare all'ostacolo, rappresentato da *AB*. *S* è la sorgente luminosa (da *Oeuvres Complètes d'Augustin Fresnel,* Imprimerie Imperiale, Parigi 1866, p. 23).

Arago, che insieme a Poinsot era stato incaricato dall'Accademia di esaminare la memoria di Fresnel, gli scrive l'8 novembre per dirgli che aveva trovato in quella memoria molte cose interessanti, per quanto non poche già osservate da Young, e aggiunge: « ... Ma ciò che né lui, né alcun altro prima di voi ha mai

visto, è che le bande colorate esterne non *camminano* in linea retta, quando ci si allontana dal corpo opaco. I risultati che voi avete ottenuto a questo proposito mi sembrano molto importanti; forse potranno servire a provare la verità del sistema ondulatorio,... ». Continua promettendogli tutto il suo appoggio per sostenere le obbiezioni che inevitabilmente si sarebbero levate contro una teoria così contraria a quella *di moda.*

È facile immaginare lo stato d'animo di Fresnel al ricevere queste valutazioni e queste promesse. Egli deve essere salito al massimo grado di eccitazione e di entusiasmo, e ha concentrato tutte le sue energie su questi studi.

E tutto ciò è stato il frutto di un complesso di circostanze fortunate e, se vogliamo, di errori. È incredibile come siano stati benèfici questi errori. Infatti che le frange esterne non *camminano* in linea retta era stato osservato fin da padre Grimaldi, e da Newton. Se Arago e Fresnel avessero letto il *De Lumine* di padre Grimaldi, avrebbero trovato già nella I Proposizione (n. 17) che il fatto era stato decisamente messo in evidenza. Lo strano era che un fatto così preoccupante per la teoria corpuscolare fosse stato messo tanto in disparte da farne perdere anche la memoria.

Fresnel, dunque, lo riesumò, sia pure credendolo una nuova scoperta, e Arago ne rimase tanto colpito che divenne subito un convinto sostenitore delle idee nuove.

La relazione di Arago e Poinsot all'Accademia fu letta nella seduta del 25 marzo 1816; faceva molti elogi a Fresnel e proponeva la pubblicazione della memoria presentata.

Chi invece non ne era soddisfatto era proprio Fresnel. Quello scambio tra le frange nere della teoria e quelle chiare dell'esperienza non gli andava. Ma più che altro non gli andava il meccanismo escogitato. Perché in questa prima memoria vi è ancora troppo influsso della teoria newtoniana. Per calcolare le sue interferenze, Fresnel considerava i « raggi diretti » e i « raggi inflessi » dagli orli degli ostacoli diffrangenti. Vi era in questo modo di ragionare una mistura di raggi e di onde; di inflessione e di diffrazione. Ancora si deve notare che se egli avesse letto il *De Lumine* vi avrebbe trovato largamente dimostrato (Prop. I, n. 18), che nella diffrazione non vi interveniva per nulla la riflessione sulla superficie dell'ostacolo diffrangente. Ma egli non lo sapeva, e andò avanti da sé, ideando una esperienza decisiva: se l'ostacolo è dissimmetrico, cioè ha un orlo sottilissimo, e uno grosso, le frange esterne, se sono formate

col meccanismo suddetto, debbono risultare appena percettibili dalla parte dell'orlo sottile e molto più nette dall'altra.

Fresnel fece la prova con un rasoio: il « filo » era enormemente più sottile della costola: l'esperienza gli dette frange identiche dalle due parti. Egli concluse che la sua teoria, anche se approvata e lodata dall'Accademia, era destituita di fondamento.

D'altra parte l'accordo tra il meccanismo delle interferenze e l'esperienza era troppo evidente (salvo lo scambio tra le frange chiare e scure): dunque bisognava cercare un'altra sorgente delle onde interferenti, che non fosse la materia dell'ostacolo.

Si potrebbe ricostruire passo per passo l'evoluzione delle idee di Fresnel, ma conviene riassumerla per non dilungarci troppo, limitandoci a mettere in risalto le tappe principali. Già in una Memoria presentata all'Accademia il 15 luglio 1816, cioè appena centodieci giorni dopo la relazione che approvava la precedente, Fresnel espone la teoria dei « raggi efficaci ». Egli ha abbandonato la materia dell'ostacolo e ha fatto appello alle « onde elementari » sulla scia di Huyghens.

Però Fresnel fa un passo avanti rispetto ad Huyghens: questi aveva utilizzato l'« inviluppo » delle onde elementari; ora Fresnel sa che le onde possono interferire, e quindi è necessario tener conto della « differenza di fase ». Ciò complica tremendamente i ragionamenti, ma egli non disarma. La posta valeva lo sforzo. Il primo passo in questo senso è dato appunto dalla teoria dei « raggi efficaci ».

La fig. 34 rappresenta in *A G* l'ostacolo, in *A* lo spigolo diffrangente. *A B C C' C''* sono tanti punti dell'onda di lume, da cui partono onde elementari, che vanno in tutte le direzioni. In un punto *F*, nell'ombra dell'ostacolo arrivano tutte le onde elementari, ma con fasi diverse. Facendo centro in *F* e con raggio uguale a *F A* più mezza lunghezza d'onda, si traccia l'arco *C E*. Poi si traccia *F C'* uguale a *F C* più mezza lunghezza d'onda, poi *F C''* uguale a *F C'* più mezza lunghezza d'onda.

Orbene le onde che arrivano in *F* dai punti del tratto *C C'* sono neutralizzate da quelle che arrivano dai punti del tratto *C' C''*, perché in opposizione di fase; e così per tutte quelle a sinistra di *C''*· in definitiva in *F* i « raggi efficaci » che vi arrivano provengono tutti dall'arco *C B A*; e siccome *A* e *C* già mandano onde in opposizione di fase, il baricentro dei raggi efficaci è molto prossimamente in *B*.

Questo meccanismo nuovo mette Fresnel in condizioni di dimi-

nuire lo scarto tra le frange chiare del calcolo e oscure dell'esperienza, che gli risultava dalla primitiva teoria sbagliata: perché invece del punto *A* ora deve essere preso il punto *B*, che ne dista un po'. Ma lo scarto non è annullato; è soltanto diminuito, circa della metà. Il passo in questo senso è ancora insufficiente, ma il progresso grande è nel fatto che ora la diffrazione è sganciata dalla materia dell'ostacolo ed è appoggiata alle onde elementari.

Fresnel chiede all'esperienza la conferma della sua nuova teoria. Se questa fosse stata giusta, gli aspetti del fenomeno dietro l'ostacolo *A G* dovevano essere identici, sia lasciando agire il tratto di onda *C C' C''*..., sia eliminandolo. Egli allora costruisce un ostacolo come quello *A B F F* della fig. 35, che nella parte superiore lascia

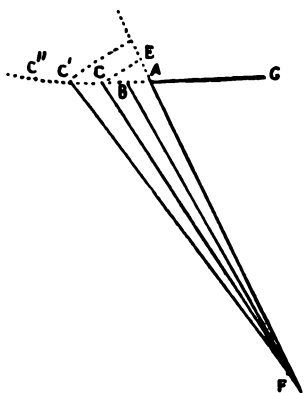



Fig. 34 - Schema della teoria dei « raggi efficaci » di Fresnel (*Oeuvres Complètes* cit., p. 161).

adito a tutte le onde elementari laterali, mentre in quella inferiore elimina quelle più lontane dagli orli diffrangenti. Lo illumina con la solita sorgente puntiforme e osserva che le frange di diffrazione dietro la parte superiore *A B C D* sono diverse da quelle dietro la parte inferiore *C D F F*.

L'esperienza dunque nega la conferma alla teoria dei « raggi efficaci »; ma indica in modo indubbio che le onde elementari emesse dai punti dell'onda anche assai distanti dagli spigoli dif-

frangenti intervengono nella formazione di tutte le frange dietro l'ostacolo.

Il passo definitivo è esposto in una nota sigillata depositata all'Accademia il 20 aprile 1818. Ritorneremo tra breve sulla storia di questa nota; intanto per concludere il decorso delle idee di Fresnel, riportiamo la fig. 36. La vibrazione in un punto *P* è la risultante di tutte le onde elementari che vi provengono dagli infiniti punti del fronte d'onda *E M A*. Per conoscerla, l'intensità di questa luce, occorre fare un'integrale. Fresnel dapprima procedette con mezzi pratici, e numerici, e già ottenne risultati in accordo completo con l'esperienza; poi i matematici risolsero definitivamente il problema anche in via teorica.

Così Fresnel, combinando il principio delle onde elementari, con quello d'interferenza, aveva dettato il principio dell'integrazione delle onde elementari, che spiegava completamente tutti i fenomeni di diffrazione. La portata di questa sintesi è espressa mirabilmente da una frase dello Schwerd, nella prefazione del suo volume: *Die Beugungserscheinungen*: « la teoria delle ondulazioni predice i fenomeni di diffrazione così esattamente come la teoria della gravitazione predice i movimenti dei corpi celesti ».

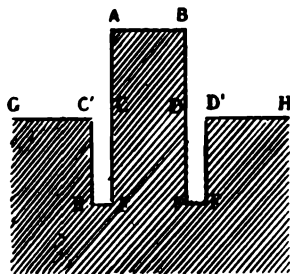



Fig. 35 - Tipo di ostacolo ideato da Fresnel per la verifica sperimentale della teoria dei « raggi efficaci ».

L'enunciato del principio di Fresnel era il seguente: « les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points sont égales à la somme de tous les mouvements élémentaires qu'y enverrait au même instant, en agissant isolément, chaque petite partie de cette onde considérée dans une quelconque de ses position antérieures ».

Questo enunciato si trova riprodotto in due note contemporaneamente: una, breve e riassuntiva presentata sigillata, come si è detto, all'Accademia il 20 aprile 1818; e una molto estesa e completa, presentata all'Accademia stessa poco prima della fine di luglio 1818, in plico anonimo, per partecipare al concorso bandito dall'Accademia il 17 marzo 1817.

Perché l'Accademia delle Scienze era, naturalmente, piena di newtoniani: particolarmente convinti Biot e Poisson. Il susseguirsi di memorie di Fresnel nel 1815, '16 e '17 li allarmò, specie per la messe sempre più vasta di fenomeni che il vulcanico ingegnere riusciva a inquadrare nel suo meccanismo, fenomeni che i

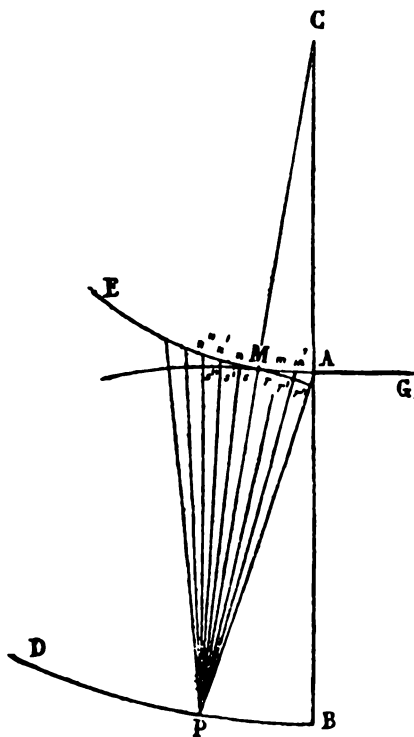



Fig. 36 Schematizzazione del meccanismo integrale con cui Fresnel spiegava le frange di diffrazione all'orlo dell'ombra di un ostacolo (dalle *Oeuvres Complètes* cit., p. 174).

newtoniani erano stati costretti a lasciare in ombra per non dover confessare la loro incapacità a spiegarli. Ormai la cosa aveva preso una proporzione pericolosa e la sfida era lanciata apertamente. Occorreva una reazione decisiva.

I newtoniani credettero giunto il momento di prendersi una rivincita clamorosa e fecero bandire dall'Accademia un concorso a premio, con la relazione seguente:

I fenomeni della diffrazione, scoperti da Grimaldi, in seguito studiati da Hooke e da Newton, sono stati, in questi ultimi tempi, l'oggetto di ricerche di numerosi fisici, specialmente di Young, Fresnel, Arago, Pouillet, Biot, ecc. Si sono osservate le frange diffratte che si formano e si propagano fuori dell'ombra dei corpi, quelle che appaiono dentro l'ombra stessa, quando i raggi passano simultaneamente dalle due parti di un corpo stretto, e quelle che si formano per riflessione sulle superficie di estensione limitata quando la luce incidente e riflessa passa molto vicino ai loro orli. Ma non si è ancora determinato a sufficienza il movimento dei raggi in prossimità dei corpi stessi dove avviene l'inflessione. La natura di questi movimenti offre dunque oggi il punto della diffrazione che più importa approfondire, perché racchiude il segreto del modo fisico con cui i raggi sono inflessi e separati in diverse bande di direzione e d'intensità differenti. Ciò che ha indotto l'Accademia a proporre questa ricerca per soggetto di un premio, bandendolo nel modo seguente:

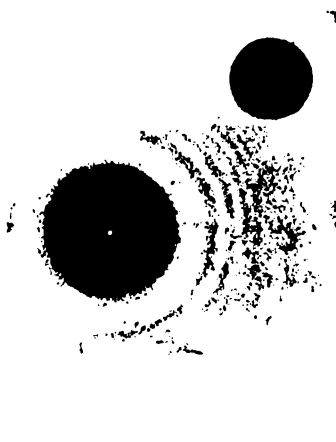



Fig. 37 Concentrazione di luce al centro dell'ombra di uno schermo circolare opaco (come quello indicato in nero a destra in alto) illuminato con una sorgente puntiforme (da V Ronchi, *Lezioni di ottica ondulatoria*).

1°) *Determinare con esperienze precise tutti gli effetti della diffrazione dei raggi luminosi diretti e riflessi, quando passano separatamente o simultaneamente vicino alle estremità di uno o più corpi di estensione sia limitata, sia indefinita, tenendo conto dell'interdistanza di questi corpi, così come della distanza dal fuoco luminoso donde emanano i raggi;*

2°) *Concludere da queste esperienze, per mezzo di induzioni matematiche, i movimenti dei raggi nel loro passaggio vicino ai corpi.*

Tema newtoniano, in termini newtoniani.

Ma nessun newtoniano si mosse. Al concorso partecipò Fresnel e un altro sconosciuto, che non fu preso neppure in considerazione. La Commissione, costituita da Biot, Arago, Laplace, Gay-Lussac e Poisson, nominò relatore Arago.

Ciò significò il trionfo di Fresnel e la sconfitta definitiva della teoria corpuscolare. Nella seduta pubblica dell'Accademia delle Scienze di Parigi del 1819, fu consegnato il premio ad Augustin Fresnel e fu segnata la fine dell'idolo newtoniano.

La lotta era finita, ma i seguaci delle vecchie idee non scompaiono ad un tratto, e non si convertono da un giorno all'altro; neppure di fronte all'evidenza più completa. Anche in passato abbiamo dovuto fare la stessa osservazione. E poi il movimento newtoniano era stato così grandioso e così profondo, che le sue tracce non potevano scomparire da un momento all'altro; tutt'altro, anzi esse si risentono ancora oggi in non poche manifestazioni. E a maggior ragione si dovevano risentire quando il cadavere era ancora caldo.

A questo proposito è rimasto famoso il comportamento di Poisson.

La Memoria di Fresnel, che occupa ben 135 pagine dell'edizione in folio delle sue *Oeuvres Complètes* era un vero trattato di ottica ondulatoria, rigurgitante di teoria e di esperienze. In essa era esposto il principio dell'integrazione delle onde elementari, come si è detto sopra, ma seguiva la dichiarazione che ciò portava ad un integrale assai complicato e non sempre calcolabile coi mezzi matematici di cui disponeva l'autore.

Si legge ora nella relazione di Arago: « Uno dei vostri Commissari, il Sign. Poisson, aveva dedotto dagli integrali riportati dall'Autore il risultato singolare che il centro dell'ombra di uno schermo circolare opaco doveva, quando i raggi vi penetravano con incidenze poco oblique, essere illuminato, come se lo schermo non esistesse. Questa conseguenza è stata sottoposta alla prova d'un'esperienza diretta e l'osservazione ha confermato perfettamente il calcolo ». La fig. 36 mostra il fenomeno in maniera evidente.

Ciò nonostante Poisson rimase newtoniano e anche dopo una prova sperimentale così brillante non si ricredette; fino alla morte, avvenuta ventidue anni dopo gli avvenimenti ora ricordati, continuò a considerare i suoi « filets de lumière » di cui per altro non dava una definizione soddisfacente. Fu sempre avversario convinto di Fresnel, ed ebbe con lui anche una vivace polemica. Ma la sua tenacia e il suo attaccamento alle idee della sua giovinezza non valsero a far risorgere una concezione che ormai si doveva considerare tramontata. Anche Biot dimostrò una tenacia incredibile nel conservare le sue idee newtoniane. Si racconta che ancora sul letto di morte, circa quarant'anni dopo il crollo della teoria corpuscolare, egli si sforzava di spiegare col modello dei corpuscoli l'ingente massa di fenomeni nuovi di cui la teoria ondulatoria aveva portato alla scoperta. Vinta la sua prima grande battaglia, Fresnel si trovò aperto dinanzi a sé un orizzonte sconfinato, ricco di possibilità e di promesse, ma anche irto di difficoltà.

Ora i fenomeni di polarizzazione e di doppia rifrazione dovevano essere inquadrati nella nuova teoria: se ciò fosse stato possibile, il trionfo sarebbe stato completo; altrimenti il primo successo si sarebbe tradotto in una catastrofe. Ed egli si mise decisamente all'opera, in condizioni un po' migliori di quelle iniziali: aveva ripreso il suo ufficio governativo e poteva recarsi assai di frequente a Parigi, ospite graditissimo del Laboratorio di Arago; anzi dal 1819 egli fu trasferito a Parigi al Servizio dei fari, ed è ben noto che anche in quel campo, così diverso da quello che ora ci interessa, lasciò tracce così profonde che ancor oggi si indicano col suo nome. Ciò gli permise di essere molto più vicino all'ambiente degli studi e di disporre di mezzi sperimentali adeguati alla finezza delle esperienze che lo sviluppo delle idee suggeriva.

Chi legga la Memoria di Fresnel premiata dall'Accademia nel 1819 resta meravigliato della padronanza che l'autore dimostra del meccanismo ondulatorio, così nuovo e così poco studiato a quei tempi, anche negli altri campi della fisica. Fresnel lo maneggia con un'abilità e una finezza come il più esperto ottico di oggi.

Un episodio è particolarmente significativo. Nello studiare le frange interne nell'ombra di un filo sottile, come si è già accennato, Fresnel aveva ideato la prova, del resto già fatta da Young, che ostruendo con un ostacolo opaco, come un foglietto di carta, il passaggio della luce dalla parte di *uno* spigolo del filo, le frange nell'ombra scomparivano *tutte*, non soltanto la metà dalla parte dello

spigolo ostruito; e questa esperienza fu considerata un colpo duro per la teoria dell'inflessione.

Ma un giorno Arago comunica, assai preoccupato, a Fresnel che lo stesso risultato si otteneva sostituendo il foglio di carta vicino allo spigolo del filo con una lamina di vetro trasparente a facce parallele. Ciò poteva mettere molto in dubbio l'efficacia della prova contro l'inflessione. Fresnel immediatamente risolve l'enigma: dimostra che quando la lamina di vetro è spessa e la luce non è molto omogenea, le frange nell'ombra divengono di ordine così elevato che non si possono più vedere; invece se la lamina fosse stata sottilissima le frange dovevano pure vedersi, ma spostate lateralmente. Arago fa l'esperienza e rimane esterrefatto: tutto risulta verificato come era stato predetto da Fresnel.

Così Young aveva fatto la classica esperienza delle interferenze dietro due fori, illuminati da una sorgente sottile: ma non era riuscita convincente, perché tutto sommato la luce passava per due vie, in cui i partigiani della inflessione potevano escogitare chi sa quali meccanismi per render conto, sia pure in modo più complicato, delle frange che si formano nella figura di diffrazione. Young le spiegava col principio d'interferenza; ma perché l'effetto teorico fosse completo, bisognava anche dimostrare che non era possibile spiegarle con l'inflessione: e questo era molto arduo.

Fresnel, per tagliare la testa al toro, escogita i ben noti dispositivi degli « specchi » e del « biprisma » che ancor oggi portano il suo nome: in queste condizioni l'interferenza avviene ancora, mentre di inflessione non se ne può più parlare. Non solo, ma il trovare le frange d'interferenza con gli specchi di Fresnel è una manipolazione delicatissima quando non si disponga di una radiazione altamente monocromatica; e ciò perché la giacitura di uno specchio rispetto all'altro va determinata al micron o a pochi micron. Fresnel calcola e prevede tutto con una sicurezza meravigliosa, e lo dice apertamente; anzi, ne trae argomento in favore della teoria ondulatoria; perché, egli dice, se una teoria permette di prevedere ed eseguire un'esperienza così delicata, in cui il caso non può aiutare per nulla, deve corrispondere alla realtà.

La critica che egli fa alla teoria degli accessi, per spiegare le frange nelle lamine sottili è addirittura feroce: egli dimostra che l'andamento sperimentale in vari particolari, come ad esempio quando si inclina la lamina rispetto al fascio illuminante, è proprio il contrario di quello che la teoria newtoniana portava a prevedere

come necessaria conseguenza, mentre la teoria ondulatoria spiega tutto con grande semplicità e naturalezza.

Ebbene quando con questa padronanza del meccanismo ondulatorio Fresnel ha affrontato l'indagine dei fenomeni di polarizzazione e di birifrangenza, ne ha tratto dei risultati che hanno lasciato attonito tutto il mondo della scienza; risultati che hanno resistito alla critica dei contemporanei e dei successori e che ancor oggi sono considerati definitivi.

Non si creda però che il suo lavoro fosse facile. Fu molto rapido, purtroppo, perché da quando fu premiata dall'Accademia la sua Memoria sulla diffrazione, il periodo produttivo fu di appena un lustro; ma le idee che egli lanciava erano così rivoluzionarie, che a un certo punto perfino l'amico Arago credette prudente sganciarsi. Ma ormai Fresnel poteva volare con le proprie ali, tanto più che l'Accademia stessa lo aveva chiamato a coprire uno dei suoi seggi.

In quei cinque anni dal 1820 al 1824 il contributo portato da Fresnel allo studio dei fenomeni di polarizzazione è veramente ingente, e non possiamo trattenerci ad analizzarlo completamente, perché ci porterebbe lontano dal nostro campo. Ci limiteremo però a riassumere gli argomenti che ci interessano direttamente.

Come abbiamo già rilevato, Fresnel aveva una padronanza completa del meccanismo ondulatorio e del comportamento delle onde nel fenomeno dell'interferenza. Egli si rese conto chiaramente del fatto che due onde per interferire debbono soddisfare a un gruppo di condizioni, che oggi si riassumono in due attributi: esse debbono essere *omogenee* e *coerenti*; avere cioè ugual lunghezza d'onda e differenza di fase costante. Ciò in pratica richiedeva che per ottenere interferenze era necessario portare a sovrapporsi onde emesse da un'unica sorgente, dopo che avevano percorso cammini ottici diversi.

Quando però cominciò a sperimentare con sostanze birifrangenti dovette costatare che facendo sovrapporre fasci emessi dalla stessa sorgente, ma separati da un cristallo in un fascio ordinario e in uno straordinario, l'interferenza non avveniva mai, comunque si variassero le differenze di cammino ottico. Egli ne concluse che due fasci diversamente polarizzati non influivano uno sull'altro. Si trattava di spiegare questo comportamento.

Nella famosa Memoria premiata dall'Accademia egli si era in più occasioni decisamente pronunciato circa la struttura delle onde costituenti la luce: esse dovevano essere modificazioni elastiche del-

l'etere, di quel fluido cioè inafferrabile e sottilissimo che riempie l'Universo e pervade anche i meati dei corpi materiali. Trattandosi di un fluido, anzi del principe dei fluidi, secondo la meccanica di allora, le vibrazioni non potevano essere che longitudinali, perché quelle trasversali si potevano immaginare soltanto in un corpo solido.

Fresnel congegna tutta la sua teoria nella diffrazione considerando longitudinali le vibrazioni delle sue onde. Ma quando si trova di fronte alla scomparsa delle interferenze nella combinazione di un fascio ordinario e di uno straordinario, arriva alla conclusione che le onde non possono essere longitudinali, ma debbono essere trasversali; anzi trova in questa qualità proprio la qualità meccanica che si traduce in ciò che caratterizza i fenomeni di polarizzazione. Infatti le vibrazioni longitudinali posseggono una simmetria di rivoluzione attorno al raggio; quelle trasversali posseggono invece una simmetria rispetto a due piani ortogonali, passanti per il raggio: quello della vibrazione e quello perpendicolare. Proprio quella simmetria che è presentata dai fenomeni di polarizzazione.

Fresnel non esita ad accettare questa struttura, tanto più che essa gli spiega esaurientemente come mai due fasci, uno ordinario e uno straordinario, non interferiscono: dal momento che due vibrazioni ad angolo retto fra loro non possono interferire, bastava immaginare che il fascio ordinario e quello straordinario fossero polarizzati in due piani ad angolo retto fra di loro, perché la teoria corrispondesse a meraviglia all'esperienza.

Questa concezione delle onde trasversali incontrò la più grande ostilità nell'ambiente della scienza, il quale ambiente non poteva concepire un etere fluidissimo e sottilissimo, che possedesse al tempo stesso le proprietà meccaniche di un solido rigidissimo; perfino Arago dichiarò che non poteva seguire il vulcanico ingegnere nelle sue acrobazie, come già abbiamo accennato. Ma Fresnel aveva invece chiara la convinzione di aver in mano la chiave di tanti misteri, e proprio col modello di onda da lui immaginato dà un assestamento definitivo al complesso dei fenomeni di polarizzazione, spiegando con una precisione insuperabile una serie interminabile di esperienze complicatissime, come quelle della polarizzazione cromatica, che proprio l'Arago aveva casualmente scoperto nel 1811, senza che i newtoniani riuscissero a darne ragione, per quanti sforzi facessero.

Continuando per questa via Fresnel arriva alla sintesi che costituisce il suo capolavoro: studiando il fenomeno della birifrangenza nei cristalli uniassici e in quelli biassici, conclude che la forma

più generale di superficie d'onda in un mezzo materiale è quella di una superficie di 4° grado, che degenera in una sfera e in un'ellisse nei cristalli uniassici, e in una sfera doppia nei mezzi isotropi.

Per terminare questa rapida rassegna dell'opera di Fresnel, vale la pena di ricordare la sistemazione che egli dette al famoso fenomeno della riflessione parziale sulle superfici trasparenti; quel semplice fenomeno che fino ad allora aveva tenuto in scacco padre Grimaldi, Newton e Huyghens, e che nelle esperienze di Malus aveva inopinatamente acquistato un'importanza speciale, essendo stato ravvicinato nientemeno che al grande mistero della birifrangenza.

È doveroso ricordare che la prima giustificazione del fenomeno della riflessione parziale fu data da Young. Il quale, dopo i primi successi del giovane ingegnere francese, riprese coraggio e si rimise al lavoro, collaborando molto utilmente mediante la sua abilità e la sua fantasia con la coppia Arago-Fresnel. Orbene nella « XXXIX Lecture » di Young, si trova il brano seguente:

Si può affermare sicuramente, pertanto, che nella ipotesi della emissione questa separazione dei raggi di luce della stessa specie con una riflessione parziale ad ogni superficie rifrangente, rimane del tutto inspiegata. Nel sistema ondulatorio, al contrario, la separazione segue come conseguenza necessaria. La cosa più semplice è di considerare il mezzo etereo che pervade ogni corpo trasparente, insieme con gli atomi materiali della sostanza, come costituente tutt'insieme un mezzo composto, più denso dell'etere puro, ma non più elastico; e paragonando le particelle contigue del mezzo più rarefatto e di quello più denso con dei comuni corpi elastici di differenti dimensioni, noi possiamo determinare facilmente non solo in quale maniera, ma anche in quale grado questa riflessione deve aver luogo nelle diverse circostanze. Così, se uno di due corpi uguali urta l'altro, gli comunica tutto il suo moto, senza alcuna riflessione; ma se un corpo più piccolo ne urta uno maggiore, ne è riflesso con tanta più forza, quanto maggiore è la differenza fra le loro grandezze; e un corpo più grande, urtandone uno minore, continua a muoversi con velocità diminuita; il moto residuo costituendo, nel caso di onde che incidono sopra un mezzo più rarefatto, una parte di una nuova serie di moti che necessariamente tornano indietro con velocità appropriata...

Dunque il misterioso fenomeno con l'avvento della teoria ondulatoria perdeva tutta la sua difficoltà.

Nelle mani di Fresnel la sua sistemazione fu definitiva e com-

pleta: l'ingerenza della polarizzazione del fascio incidente, dell'angolo di incidenza, dell'indice di rifrazione dei due mezzi a contatto è stata precisamente definita con quelle che ancor oggi si chiamano le « formule di Fresnel » e che ancor oggi sono considerate pienamente valide, perché confermate da un secolo e mezzo di collaudo sperimentale.

Ma col 1824 la salute di Fresnel, che era sempre stata cagionevole, divenne così malferma che egli riuscendo a stento a far fronte ai doveri del proprio ufficio presso il Servizio dei fari, dovette rinunziare ad ogni altro lavoro. Ai primi del 1827 sospese anche la sua attività d'ufficio, e il 14 luglio chiudeva, appena trentanovenne, la sua giornata terrena.

Così, nella prima metà del secolo scorso, si era andato definendo un modello meccanico della luce, con le caratteristiche seguenti.

In un etere fluidissimo, inafferrabile, insensibile, dotato delle caratteristiche meccaniche di un corpo rigido, pervadente tutto l'universo e i meati della materia ponderale, si propagano onde di lunghezza fra 0,8 e 0,4 micron, con una velocità di 300.000 Km. al secondo nel vuoto. Ciò implica una pulsazione di circa 5.10^{15} cicli al secondo. Questa vibrazione di natura elastica, è completamente trasversale. Quando le vibrazioni avvengono tutte parallelamente ad un piano a sua volta parallelo alla direzione di propagazione, l'onda si dice polarizzata e manifesta simmetria di comportamento rispetto al piano suddetto. I fasci di tante onde, ognuna delle quali è polarizzata rispetto ad un piano proprio, ma diverso da onda a onda, non presentano più tale simmetria, ma ne presentano una di rivoluzione attorno alla direzione di propagazione e si dicono di luce naturale.

Queste vibrazioni pervadono la materia, in quanto si propagano nell'etere contenuto nella materia stessa, ma modificato da questa nelle sue caratteristiche meccaniche. Ne segue un duplice fenomeno alla superficie di separazione o di discontinuità, tra le zone di etere puro e quelle di etere commisto a materia: una parte delle vibrazioni ritorna indietro nell'etere puro con le leggi della riflessione e una parte penetra nella zona commista: le frazioni della prima e della seconda parte sono determinate da varie circostanze, quali la lunghezza d'onda e lo stato di polarizzazione della luce incidente,

l'angolo d'incidenza e la natura della zona materiale. In ogni caso in questa zona materiale la velocità di propagazione della vibrazione è funzione della lunghezza d'onda e ciò implica la rifrazione e la dispersione. Fenomeni affini avvengono quando la vibrazione passa da un mezzo materiale ad un altro, dotato di caratteristiche diverse.

La propagazione in un mezzo omogeneo è regolata dalle leggi comuni a tutte le onde, per cui ogni punto colpito dalla vibrazione diviene centro di onde elementari e si forma un fronte di onda là dove avviene un inviluppo di onde elementari in fase. Se il mezzo è anche isotropo, le onde sono sferiche col centro nella sorgente puntiforme; quando il mezzo è anisotropo, nella forma più generale la superficie d'onda è di quarto grado; degenera in una sfera e in un ellissoide quando il mezzo ammette un asse di simmetria.

Se le onde incontrano ostacoli o comunque il loro fronte viene alterato con zone di discontinuità, l'applicazione dei princìpi fondamentali della propagazione porta a dei risultati più complessi, che si riassumono nel gruppo dei fenomeni di diffrazione.

Se due onde coerenti ed omogenee e non polarizzate ad angolo retto una rispetto all'altra si sovrappongono, avviene l'interferenza, cioè il risultato complessivo non è sempre la somma aritmetica dei singoli impulsi presi separatamente, ma può esserne anche minore e può essere anche nullo, in conseguenza della « fase » relativa dei due moti che si combinano.

Le onde di diversa lunghezza d'onda eccitano negli occhi degli uomini sensazioni di colori diversi; minore è la lunghezza d'onda, più il colore si sposta verso il violetto nella scala dell'iride.

Non si può non ammirare una sintesi così grandiosa.

Eppure i vecchi newtoniani non disarmarono e non perdettero le intime speranze di una rivincita delle concezioni impartite loro dai venerati maestri nella loro gioventù: concezioni a cui si erano affezionati, su cui aveva discusso e ragionato, con convinzione, con piena fede, con grande ammirazione. Esse erano divenute come una parte di loro stessi e non se ne potevano distaccare.

Le difficoltà che la meccanica stessa creava alla trasversalità delle vibrazioni, i problemi che la concezione dell'etere sollevava ad ogni momento e che richiedevano continue revisioni delle concezioni correnti sulla costituzione della materia e sulla natura dello spazio fisico, alimentavano le segrete speranze dei nostalgici della teoria dell'emissione.

Ma nel 1849 Foucault [15] e Fizeau [16] riuscirono ad eseguire misure della velocità della luce nell'ambito terrestre prima col noto metodo della ruota dentata e poi con quello dello specchio ruotante: quest'ultimo permetteva la misura addirittura nell'ambito di un laboratorio. Facendo passare i fasci luminosi attraverso a lunghi tubi pieni di liquidi, fu possibile fare la dimostrazione diretta che la velocità della luce è minore in questi che non nell'aria o nel vuoto.

Di fronte a questa costatazione sperimentale anche i più tenaci newtoniani dovettero rinunciare ad ogni velleità di ripresa.

[15] Jean Bernard Léon Foucault nacque a Parigi nel 1819 e vi morì nel 1868.

[16] Hyppolite Louis Fizeau nacque a Parigi nel 1819 e morì a Venteuil nel 1896.

Capitolo ottavo

CHE COS'È, DUNQUE, LA « LUCE »?

Il fatto incontestabile che la teoria delle onde predicesse i fenomeni di diffrazione, di interferenza e di polarizzazione « così esattamente come la teoria della gravitazione predice i movimenti dei corpi celesti », e proprio in tre gruppi di fenomeni che da quando erano stati scoperti avevano costituito un insieme di misteriose difficoltà insuperabili, aveva generato nei fisici la convinzione che questa teoria fosse addirittura « la verità ». Tutto ciò contribuì anche a rafforzare la già profonda convinzione dei fisici che la realtà fisica fosse un'entità afferrabile e conoscibile.

Qualcuno faceva delle riserve a questo proposito, ma veniva considerato come un astruso filosofo, lontano dalla realtà e dall'esperienza. Nella scuola, ove si formano le menti dei giovani e l'opinione generale, si impartiva ormai la nozione indiscussa e indiscutibile che la « luce » era un complesso di onde di lunghezza variabile da 0,4 a 0,8 micron, e che le singole onde dalle più corte alle più lunghe costituivano la scala dei colori dell'iride dal violetto al rosso.

Questa affermazione era in sostanza quella stessa dei newtoniani, con la sola variante che a corpuscoli di certe dimensioni erano ora sostituite onde di una certa lunghezza. Lo scivolamento sulla china iniziato da Newton quando disse che chiamava « rubrifici o rossi » i raggi che facevano vedere il rosso era ormai così avanzato, che nessuno più si rifaceva alle origini, e l'opinione generale si era assuefatta all'idea che i raggi newtoniani rossi fossero come una polverina rossa, propagantesi alla velocità di 300.000 Km. al secondo; e che il rosso fosse sempre una tal polverina. Quando le onde detro-

nizzarono i corpuscoli, una concezione così materialistica del colore diventava addirittura grottesca, ma ormai l'abitudine a considerare il rosso come qualcosa di fisico, di esterno all'osservatore era diventata così profonda e naturale, che si continuò a parlare di onde rosse, e insieme di onde gialle, verdi, azzurre e violette. Tanto più che ora la lunghezza d'onda si misurava, e facilmente, ossia che il colore fosse una caratteristica fisica della luce, mentre nella teoria corpuscolare era una pura ipotesi, perché nessuno aveva misurato le masse dei vari corpuscoli, ora invece era proprio una costatazione sperimentale.

Eliminata così ogni possibilità di considerare altrimenti la luce e il colore, persuase cioè tutte le giovani menti degli allievi delle scuole al loro primo e ingenuo passo in questi difficili argomenti, che luce e colore erano fenomeni fisici di cui si conosceva perfettamente il meccanismo, di modo che si potevano prevedere nei più minuti particolari i decorsi delle esperienze più complicate, lo studio della luce e del colore proseguì infaticabile, per definire sempre meglio la natura di queste entità, e le loro leggi.

In tre direzioni ci piace di seguire gli sviluppi di queste indagini. Una è quella degli studi sulla natura della luce; l'altra è quella della misura della luce; infine, come terza, quella della misura del colore.

Nella prima metà del secolo XIX le onde di Fresnel erano onde elastiche, trasversali. Il mezzo in cui esse si propagavano era l'etere, quel misterioso fluido inafferrabile, che riempiva tutto l'Universo e permeava i corpi materiali.

La trasversalità delle vibrazioni, necessaria perché la teoria ondulatoria rendesse conto di considerevoli gruppi di fenomeni luminosi, portava ad attribuire a questo etere proprietà stranissime, come abbiamo già rilevato. Le sue relazioni con la materia, l'eventuale immobilità rispetto a questa o un eventuale trascinamento totale o anche solo parziale costituirono subito l'oggetto dell'indagine scientifica, però senza risultati degni di molto rilievo.

Un mutamento profondo si ebbe nella seconda metà del secolo stesso: lo sviluppo degli studi elettromagnetici culminò, per quello che ci riguarda, nell'ardita teoria del Maxwell [1], che nel 1873 arrivò

[1] James Clerck Maxwell nacque a Edimburgo nel 1831 e morì a Cambridge nel 1879.

a considerare le onde luminose come onde elettromagnetiche, identiche, a parte la lunghezza d'onda, a tutte le altre onde ottenibili per irradiazione da circuiti dotati di opportune caratteristiche induttive e capacitive. Le esperienze di Hertz [2] del 1888 segnarono il principio dell'« ottica delle onde elettromagnetiche », così detta perché anche di queste onde ottenute con oscillatori elettromagnetici, fu possibile osservare la riflessione, la rifrazione, la diffrazione, l'interferenza, la polarizzazione, proprio con le stesse leggi che nell'ottica erano state definite per la luce.

La natura elastica delle onde luminose era così tolta di considerazione ed era sostituita col modello elettromagnetico.

Ma le cose non andarono lisce per molto tempo: l'affermarsi dei concetti energetici portò a considerare anche le onde luminose da questo punto di vista, e le interazioni fra luce e materia, sia nella fase di emissione (cioè per ciò che riguarda le sorgenti luminose) sia in quella di assorbimento da parte dei corpi illuminati, furono oggetto di innumerevoli indagini teoriche e di misure, e si dovette arrivare alla conclusione che le cose non andavano troppo bene.

Nel 1900 per opera di Max Planck si istaurò il concetto quantistico dell'energia. Nel 1905 Einstein [3] estendeva questo concetto di discontinuità anche all'energia luminosa e dimostrava come mediante il modello dei « quanti di luce » (che N. G. Lewis nel 1926 chiamò « fotoni ») si rendeva conto di un cospicuo gruppo di fenomeni, che col modello ondulatorio classico apparivano inconciliabili. Si venne così a quel grandioso dissidio fra onde e fotoni che ha gettato tanta perplessità nell'animo dei fisici, e li ha indotti a rivedere i concetti fondamentali della scienza e addirittura a riesaminare le sue possibilità e le sue finalità.

Questo dissidio, manifestatosi nel seno dei fisici al tempo stesso che la teoria della relatività metteva sotto processo i concetti di tempo e di spazio, distruggeva tutta quella euforia che nel secolo XIX aveva suscitato tanta fiducia nella ricerca scientifica e nell'indagine sperimentale.

Però noi sorvoliamo molto rapidamente sopra questo periodo così burrascoso. Per quanto possa sembrare strana la nostra afferma-

[2] Heinrich Rudolph Hertz nacque a Amburgo nel 1857 e morì a Bonn nel 1894.

[3] Albert Einstein è nato a Ulma nel Württemberg nel 1879.

zione, diciamo che non possiamo entrare nei particolari di sì imponente vicenda, perché ci porterebbe lontano dal nostro campo.

La « misura della luce » proseguì assai stentatamente sulla via tracciata dal Bouguer, di cui abbiamo dato un rapido cenno nel Cap. VI. È veramente ammirevole la fede e la tenacia dimostrata da coloro che si sono dedicati a questo lavoro. Ed è anche molto notevole il loro comportamento perché costituisce un esempio mirabile della potenza dei preconcetti, anche nelle indagini sperimentali che vogliono essere « obbiettive » e il più possibile « impersonali ».

È evidente che il proposito di « misurare la luce » poteva nascere soltanto nella mente di una persona convinta che la luce fosse un'entità misurabile; ma per esser misurabile, deve essere obbiettiva, esterna all'osservatore; perché se uno avesse considerato la luce come un'entità soggettiva, psichica, non si sarebbe proposto di misurarla con mezzi fisici.

C'è un altro campo della fisica che ci offre la prova di quello che ora abbiamo detto. Nella termica, infatti, si è fatta una distinzione ben netta fra « calore » e « caldo » o « freddo ». I fisici hanno messo bene a posto le cose: il caldo e il freddo sono entità soggettive, sono sensazioni sentite da un osservatore; chi le sente in un modo, chi in un altro; uno sente caldo quando un altro sente freddo e anche sotto lo stesso agente esterno, lo stesso osservatore a volte sente caldo, a volte sente freddo. Ciò dunque non interessa la fisica. Questa si occupa soltanto di ciò che esiste in sé, indipendentemente dall'osservatore. Ebbene l'agente esterno, che fa sentire caldo o freddo quando un essere vivente ne viene investito, è stato chiamato « calore »; esso, e soltanto esso, è stato preso in considerazione dai fisici; e siccome trovavano che l'uomo, come rivelatore e segnalatore del calore era uno strumento troppo incerto e per di più dotato di un « campo » molto ristretto, l'hanno eliminato e lo hanno sostituito con termometri, bolometri, pile termoelettriche, ecc.; e del « caldo » e del « freddo » in fisica non se ne è parlato più.

Questo è effettivamente il giusto modo di ragionare dei fisici.

Lo strano invece è che per la luce (e anche per il « suono ») questo metodo chiaro e inequivocabile non si sia mai applicato. Evidentemente, perché non si pensava che la « luce » fosse qualche cosa

della stessa natura del « caldo », ma che fosse invece qualche cosa della natura del « calore ». E così è nata e si è sviluppata la fotometria.

La quale, naturalmente, procedeva molto zoppicante, perché basata su un concetto molto discutibile. Soltanto in questi ultimi decenni si è assestata ragionevolmente. Ma per molto tempo vi è stata una fotometria provvisoria, molto indefinita.

Finché si è trattato di eseguire misure relative, cioè misure che esprimevano percentuali di luce riflessa, di luce trasmessa, di luce diffusa, e affini, le cose sono andate bene, perché si trattava di misure veramente fisiche; se anche si usava l'occhio come mezzo di rilevazione e di confronto, non si entrava in questioni complicate, perché si aveva cura di richiedergli soltanto un giudizio di eguaglianza. Fin dal tempo del Bouguer, come si è già rilevato, i metodi di misura fotometrica erano stati portati ad essere metodi di zero, perché si era costatato che a nessun osservatore si poteva chiedere un giudizio sul rapporto di intensità luminose, che desse un qualche affidamento.

Già questo voleva dire che quando uno « vedeva » una certa intensità agiva in base a certi suoi meccanismi personali, inafferrabili e incontrollabili, che sotto l'azione dello stesso agente esterno davano ora un certo effetto, ora un altro.

I fotometristi allora attribuirono al funzionamento dell'organo visivo queste incertezze e queste anomalie e ne lasciarono lo studio ai fisiologi e agli psicologi. Essi pensarono di eliminare ogni difficoltà, riferendosi a un « occhio normale » cioè ad un occhio fittizio, stabilito per convenzione, e quindi invariabile. Naturalmente furono fatte numerose determinazioni per scegliere quest'occhio in modo che fosse il più vicino possibile al maggior numero di occhi reali, e quindi prossimo alla media di questi.

Con questo artificio i fotometristi si sono resi indipendenti dai capricci della fisiologia e della psicologia della visione, e sono andati avanti convinti di fare delle misure fisiche della « luce » fisica.

E per molto tempo si è parlato di fotometria in luce bianca, e di fotometria in luce monocromatica e di fotometria eterocromatica. Quella vera era quella in luce bianca. Però mancava la definizione di « luce bianca ». Quando la si è cercata, si è dovuto concludere che quella era una frase senza senso fisicamente definito, che di luci bianche ne esisteva un numero enorme, che una stessa luce appariva bianca in certe condizioni e assumeva un colore anche assai

accentuato in altre condizioni, ed infine chi doveva decidere se essa era bianca o no, era ancora l'osservatore, con tutti i suoi capricci fisiologici e psicologici, aggravati ora dalla questione del colore.

La conclusione è stata che anche la « luce bianca » è stata definita per convenzione (anzi ne sono state definite più d'una), mediante certi campioni chiamati illuminanti *A*, *B* e *C*; e con l'intesa tacita che la fotometria in luce bianca si farà con le sorgenti ordinarie, anche se non sono gli illuminanti tipici, contentandosi dei risultati più o meno incerti che è possibile trarre dalle misure. L'esperienza in fin dei conti ha dimostrato che le varie luci bianche si possono confrontare fra di loro, e quindi misurare, anche se vi sono delle differenze di tono di colore: con questo, che l'approssimazione delle misure è tanto maggiore quanto minori sono queste differenze.

Non si può non vedere in tutto questo un continuo ripiego, e non si può non ammirare la tenacia dei fotometristi che si sforzavano di afferrare un qualche cosa che sfuggiva loro da ogni parte.

Quanto alla fotometria monocromatica ed eterocromatica, per molto tempo fu considerata una pratica o di scarso interesse (quella monocromatica) o di enorme difficoltà (quella eterocromatica); tanto enorme difficoltà da non presentare utilità pratica. Non ci attarderemo a tracciarne ora gli sviluppi, perché questa branca della fotometria in realtà ha assunto un'importanza adeguata quando è stata chiamata colorimetria. E su questa ritorneremo fra breve.

Tornando dunque alla fotometria ordinaria in luce bianca, si è definito il campione di intensità e si sono definite le grandezze e le unità fotometriche: quantità di luce, flusso, intensità e luminanza. Lasciando da parte l'illuminazione, vorremmo richiamare l'attenzione del lettore sul significato di queste grandezze: che cosa vuol dire « quantità di luce »? Nei testi essa è definita come il flusso luminoso moltiplicato per il tempo per cui avviene l'erogazione. E il flusso? È l'intensità moltiplicata per l'angolo solido, in cui avviene l'emissione. E l'intensità? È il numero di candele di una sorgente, determinato mediante confronto col campione fondamentale. Dunque per avere la « quantità di luce » emessa da una sorgente, se ne determina l'intensità con un fotometro, confrontandola con la sorgente campione; il numero di candele così ottenuto si moltiplica per un certo angolo solido, in cui avviene l'emissione, e se ne ottiene il flusso (espresso da un certo numero di « lumen »); questo si moltiplica per il numero di ore, per cui la sorgente rimane accesa, e si ottiene un prodotto, detto di « lumen-ora », che ci deve misurare

la quantità di luce emessa da quella sorgente in quell'angolo solido, in tutto quel tempo.

Questa è una luce emessa dalla sorgente, luce che ha viaggiato in un certo angolo solido. Dunque è una luce che è esistita anche se nessun osservatore l'ha ricevuta e l'ha vista. È una « luce esterna ». Ecco che cos'è la luce della fotometria.

Ma se fuori di noi vi sono onde, o corpuscoli, o fotoni, sono essi la luce?

Ecco il punto cruciale. La sorgente emette onde, o fotoni che dir si voglia: esse non sono « luce »; sono movimento, sono energia (sono materia, se vogliamo includere nel ragionamento anche l'ipotesi corpuscolare); sono qualche cosa di *rubrifico*, ma non di *rosso*, perché per diventare rosso, quel qualche cosa deve raggiungere il fondo di un occhio, impressionarlo, e far trasmettere degli impulsi nervosi a un cervello, a una psiche; e lì si avrà il *rosso*, non prima. E quello che si dice per il rosso, vale per il verde, il violetto, e anche per il bianco. Ecco dove lo scivolamento dal *rubrifico* al *rosso* di newtoniana memoria è stato l'origine di un equivoco che ormai dura da secoli, e che mina tuttora le fondamenta della fotometria.

Naturalmente anche gli equivoci più profondi alle prese con la critica scientifica finiscono con l'essere isolati e chiariti. Oggi anche la fotometria sta consolidando le proprie basi con elementi razionali: ma prima di venire alle conclusioni definitive, conviene fare una breve rassegna dell'evoluzione della colorimetria.

Senza riepilogare il lungo e difficile lavorìo degli antichi attorno al concetto di colore, di cui tante volte abbiamo parlato nei capitoli precedenti, prendiamo le mosse dalla dimostrazione di padre Grimaldi che i colori non sono una cosa distinta dalla luce e residente sui corpi, « ut vulgo putatur », come generalmente si crede. Già a suo tempo rilevammo quanta importanza padre Grimaldi attribuisse alla sua dimostrazione, fino al punto da inserire il testo suddetto nel titolo del suo Libro secondo.

Egli anzi avanzò l'idea che il colore fosse dovuto a una vibrazione del fluido costituente il lume; anticipando così embrionalmente il concetto che poi si affermò nella teoria ondulatoria.

Ma fu uno dei grandi meriti di Newton l'aver trovato la corrispondenza fra la rifrangibilità dei vari raggi e il loro colore. La scoperta della dispersione dei prismi, e la ricca messe di esperienze

fatte con essi sull'analisi delle luci complesse, scomponendole in luci elementari non più scomponibili, e sulla sintesi per cui ricomponendo queste luci elementari si potevano riottenere quelle originarie, produsse la convinzione che il problema fosse ormai definitivamente sviscerato, e che non vi fosse altro da dire riguardo al colore, dopo quello che aveva detto Newton.

I newtoniani, esagerando anche in questo campo, come abbiamo visto che hanno esagerato in tanti altri, dimenticarono le riserve che Newton aveva fatto: forse un po' troppo succintamente, ma che aveva fatte. Nella Proposizione VII, Libro I, Parte II, scrive:

> Però in tutta questa trattazione, quando dico colori, vorrei sempre intendere quelli che hanno origine effettivamente dalla luce. Ve ne sono infatti di quelli che hanno origine da altre cause: come quando per le forze dell'immaginazione vediamo nei sogni dei colori davanti a noi; o al pazzo sembra di vedere ciò che non esiste; o quando uno, per un colpo sopra un occhio, vede come un fuoco; o quando comprimendo il fianco degli occhi, mentre si volge lo sguardo altrove, vediamo dei colori che richiamano la lunetta della penna di pavone. Quando queste cause o altre affini non intervengono, ogni colore corrisponde sempre alla specie o alle specie dei raggi, di cui sia composta la luce;... [4].

Naturalmente la bellezza e l'importanza di tutto lo studio fatto sui colori « che hanno effettivamente origine dalla luce » hanno preso il sopravvento, e non è poi tanto strano se degli altri colori, originati in circostanze così anormali e rare, non se ne è parlato più.

Però il fatto che esistono anche questi doveva richiamare un po' l'attenzione: ed effettivamente la richiamò, ma assai tardi, e, al solito, a persone estranee all'ambiente accademico. Bisogna arrivare ai primi anni del secolo XIX per trovare qualcuno che avesse il coraggio di dir male di Newton.

Merita di esser segnalato a questo proposito il gesto strano di

[4] « ... Caeterum in hoc omni argumento, cum colores dico, eos semper intelligi colores velim, qui ex lumine revera oriantur. Sunt enim qui aliis ex causis ortum suum habeant: ut quum imaginationis viribus colores in somniis nobis objectos videmus; aut insanus ea, quae non sunt, videtur sibi videre; aut percusso oculo, ignem quis sibi elisum videt; aut comprimendo oculorum angulum alterum, dum acies alio convertatur, colores videmus plumae pavoniae lunulam referents. Ubi hac aut harum similes causae non interveniunt, color omnis semper respondet generi aut generibus radiorum, ex quibus lumen compositum sit;... » (Newton, *Optice* cit., Libro I, Parte II, Prop. VII).

Goethe[5], il famoso letterato, che nel 1810 pubblica un grosso volume di ben 1400 pagine *Zur Farbenlehre* (*Sulla teoria dei colori*) per scagliarsi violentemente contro Newton, e per rivendicare la natura soggettiva del colore, contro la prepotenza irragionevole dei newtoniani, che l'avevano ridotto a un semplice meccanismo fisico e che non tolleravano alcun dubbio o riserva in proposito, opprimendo in un assoluto silenzio tutto ciò, e non era poco, che poteva dar noia al loro modo di considerare le cose. La convinzione del Goethe doveva esser molto profonda, ed egli deve aver sentito proprio la necessità di combattere questa battaglia come il solo veggente in un popolo di ciechi, perché soltanto così si spiega e si giustifica il suo gesto. Non vi poteva esser alcun beneficio per lui dal dedicare tanto tempo e tanta attività, quanto quella necessaria per scrivere un volume di tal mole; per lui, autore famoso nel campo letterario, e che d'altra parte nella lotta contro Newton si trovava certamente in grande inferiorità nel campo della scienza. Se egli lo ha fatto, deve esservi stato spinto dalla convinzione di essere il solo a poterlo fare e quindi di doverlo fare.

Ed effettivamente egli era solo a pensarla in quel modo, ma rimase anche solo, e la sua voce fu accolta e compresa soltanto da un altro illustre filosofo, lo Schopenhauer[6], che ribadì i concetti del Goethe in un suo volumetto *Ueber das Sehen un die Farben* (*Sulla visione e i colori*) del 1816, e vi aggiunse qualche perfezionamento.

Però non è il caso di entrare in particolari sul contenuto delle critiche e delle proposte di questi due filosofi, perché la loro voce non ebbe alcun seguito. In quegli anni i newtoniani avevano ben altri pensieri: avevano in casa un pericolo imminente e gravissimo, che in breve tempo doveva portarli all'annientamento, e non avevano quindi ragione di raccogliere la sfida lanciata da estranei del tutto innocui. Quanto ai successori, erano ancora troppo principianti ed occupati nell'affermazione dei principi fondamentali della teoria ondulatoria, per andarsi ad occupare di un'altra faccenda così complessa; e d'altra parte il tono del Goethe era proprio quello di uno che se la prendeva con Newton (nel suo libro riporta letteralmente il testo di molti brani dell'*Optice*, per criticarli passo per passo);

[5] Wolfang Johann von Goethe nacque a Francoforte sul Meno nel 1749 e morì a Weimar nel 1832.

[6] Arthur Schopenhauer nacque a Danzica nel 1788 e morì a Francoforte nel 1860.

perciò i seguaci delle nuove teorie non erano chiamati in causa. Un insieme di circostanze, diciamo, disgraziate, per le quali la voce dei due filosofi non ebbe neppure quell'effetto che avrebbe potuto avere se fosse stata gridata in un'altra congiuntura.

C'è da giurare, per altro, che se anche il momento fosse stato più propizio, l'effetto delle proteste goethiane sarebbe stato molto modesto. Perché queste erano un richiamo al passato, erano un ritorno al soggettivismo, in un'epoca in cui l'obbiettivismo imperava, e straripava da ogni parte, anche con manifestazioni esagerate. Era l'epoca in cui la « nuova filosofia naturale » celebrava l'annientamento della filosofia classica, e di questa nessuno ne voleva sentir parlare, nemmeno in ciò che essa aveva di buono e di indistruttibile. Il ritorno al passato, nei secoli XVIII e XIX era guardato con commiserazione, come la cosa più stupida che si potesse immaginare. Per questo anche quando Tommaso Young si occupò dei colori, non prese per niente un indirizzo che si avvicinasse a quello del Goethe.

Come abbiamo visto, Young aveva studiato medicina, ed era animato da uno spirito ribelle e antidogmatico. Dunque non era un fisico e non era legato alla scuola newtoniana. Anzi, una volta messosi nell'indirizzo ondulatorio, per ciò che riguardava la natura della luce, divenne decisamente antinewtoniano. E allora andò a rivedere le bucce anche alla teoria dei colori.

Naturalmente, data la sua preparazione e la formazione mentale, fece le cose più da fisiologo che da fisico, però sempre più da fisiologo tendente al fisico, che da fisiologo tendente allo psicologo. In altri termini egli puntò sull'ingerenza che l'organo periferico della vista, l'occhio considerato come organo di senso, aveva nella formazione dei colori, e si propose di studiare e di definire questa ingerenza, senza spingersi nei tenebrosi recessi della psiche dell'osservatore. Quest'indirizzo è stato molto fecondo, perché non ha incontrato l'ostilità tacita ma generale del mondo scientifico ottocentesco, e, sia pure con una discreta lentezza, ha avuto seguito ed è stato per così dire l'inizio della moderna colorimetria.

Allo Young si deve il concetto fondamentale della tricromia; ossia egli rilevò che i colori non erano univocamente determinati dalla composizione fisica del fascio di corpuscoli o di onde incidente sull'occhio, ma uno stesso colore si vedeva mandando su quest'occhio fasci di composizione molto diversa. Anzi, presi tre colori fondamentali e miscelati in proporzioni opportune, si poteva ottenere

una gamma illimitata di toni e di gradazioni, fino anche a dire che si ottenevano tutti i colori possibili, compresi anche certi colori, come i porpora e i magenta, che non figurano nella successione dell'iride.

Questo modo di considerare le cose spostava il baricentro della questione dalla struttura del fascio luminoso alla struttura della retina. In altre parole, l'elemento fisiologico prendeva il sopravvento su quello fisico. Young avanza l'ipotesi che nella retina esistano tre specie di ricettori, atti a rispondere ciascuno a uno dei tre colori fondamentali; la sensazione di un colore piuttosto che di un altro doveva risultare dal come i tre gruppi di ricettori venivano impressionati. Se due fasci di composizione fisica diversa agivano su questi ricettori in ugual maniera, ciò portava alla sensazione dello stesso colore, sia con l'uno, sia con l'altro.

Di fronte a considerazioni di questa natura i fisici trovarono naturale ignorarle, e continuarono a considerare i « loro » colori, lasciando ai fisiologi il compito di indagare il funzionamento dell'occhio. D'altra parte la formazione filosofica della scuola newtoniana era stata così profonda, che l'indirizzo « obbiettivo » degli studi continuò ad imperare indiscusso e indiscutibile, anche quando le onde subentrarono ai corpuscoli materiali.

Però il principio tricromico non cadde: ripreso da Grassmann [7] e da Maxwell, ebbe piena valorizzazione per opera di uno scienziato famoso, H. L. Helmholtz [8]. Il quale avendo studiato medicina e fisiologia, ed avendo una profonda e varia cultura scientifica, era nelle condizioni migliori per abbracciare il vasto campo interessato al colore. La teoria tricromatica ebbe un grande sviluppo per opera sua e del suo valente collaboratore Arthur König; però, come avviene a tutte le teorie, quando vengono forzate nelle loro possibilità, anche quella di Young-Helmholtz, portata alle ultime conseguenze cominciò a dimostrare la sua insufficienza nei confronti dei fatti sperimentali.

Coll'approssimarsi del secolo XX il numero dei cultori della colorimetria si moltiplica, la mole del materiale sperimentale, normale e anormale, diviene ingente, e si arriva a delle conclusioni e a delle convenzioni che vengono sancite per accordo internazionale dalla Commissione internazionale dell'illuminazione.

[7] Hermann Grassmann nacque a Stettino nel 1809 e vi morì nel 1877.

[8] Hermann Ludwig Helmholtz nacque a Potsdam nel 1821 e morì a Berlino nel 1894.

In linea generale, si possono fare i rilievi seguenti. Il principio tricromatico, anche se riconosciuto non perfetto, è stato accettato come base fondamentale. Però si è dovuto riconoscere che non esiste *una* terna di colori fondamentali, ma la scelta dei tre colori coi quali, variando le proporzioni, si possono ottenere tutti gli altri, si può dire arbitraria, entro larghi limiti, a parte le questioni di praticità. Ciò porta a considerare non rispondente alla realtà l'ipotesi di Young di una struttura tripartita del sistema sensorio dell'occhio.

Quello che ha conservato il suo carattere preminente, nelle questioni di colore, è stato il numero tre. Anzi si è giunti alla conclusione che per definire un colore sono necessari tre parametri; i quali possono essere le tre percentuali dei colori fondamentali, ma possono essere anche posti sotto altra forma. Una delle conclusioni più interessanti della Commissione internazionale dell'illuminazione è appunto che ogni colore è caratterizzato dalla sua brillanza, dal tono di colore e dalla saturazione. La brillanza è quella caratteristica di un corpo per cui lo si dice più chiaro o più scuro, pur avendo lo stesso colore, come quando esso viene illuminato di più o di meno; il tono di colore è quello che si esprime coi consueti termini di rosso, verde, giallo, etc.; la saturazione è l'elemento per cui un rosso differisce da un rosa, un verde puro da un verdolino chiaro; cioè ogni colore è stato considerato come la miscela di un colore puro o spettrale, o « saturo », e di una certa dose di « bianco », che ne attenua la saturazione. Dato un colore complesso qualunque, si è chiamata « lunghezza d'onda dominante » quella del colore spettrale corrispondente.

E così si sono dettati i metodi e si sono costruiti gli strumenti che « misurano il colore ». Con manipolazioni assai delicate, ma concettualmente molto semplici, si arriva a determinare di un dato campione la lunghezza d'onda dominante, la saturazione e la luminanza, una volta stabilita la composizione spettrale della sorgente di luce con cui il campione stesso viene illuminato.

Perché i colorimetristi, partiti con lo scopo di « misurare il colore di un corpo », indipendentemente dall'osservatore, come deve fare ogni persona che operi con indirizzo fisico, hanno dovuto concludere che l'effetto cromatico, cioè quello che uno vede quando guarda quel corpo, dipende da tre elementi:

1) la composizione spettrale della luce illuminante;

2) le proprietà fisiche (di riflessione, o di trasmissione) del corpo in esame;

3) le proprietà sensitive dell'apparato visivo dell'osservatore.

Allora, dal momento che lo scopo da raggiungere era quello di determinare il 2° fattore, in quanto determinante del colore, è stato necessario « stabilizzare » gli altri due fattori. In altri termini si è detto: dal momento che il colore di un corpo si vede diverso quando cambia la luce illuminante, e quando cambia l'occhio osservatore, e spesso anche con lo stesso occhio, in conseguenza di numerose cause fisio-psicologiche (come la stanchezza, l'adattamento, lo spavento, l'immaginazione, etc.), se vogliamo trovare una terna di numeri che ci definisca « il colore di quel corpo » è necessario stabilire per quale sorgente e per quale occhio si vuol fare l'operazione.

E così si è definito l'illuminante, come si è già detto, e si è definito l'occhio. Si è stabilita cioè per convenzione internazionale la curva di sensibilità cromatica dell'occhio per le radiazioni spettrali pure, ossia in funzione della lunghezza d'onda. Siccome poi nelle determinazioni visuali interveniva un occhio, che poteva essere (anzi in generale era) diverso da quello convenzionale, si sono ideati metodi « impersonali » cioè del tutto obbiettivi, che finiscono col dare i tre numeri caratteristici del colore che vedrebbe l'occhio convenzionale, su quel corpo illuminato con l'illuminante convenzionale.

L'apparato è bello, si presenta bene, ma porta un'etichetta ben chiara; su essa è scritto: « si rinuncia a misurare il colore ».

Ed era inevitabile che si dovesse giungere a questa conclusione. Perché il colore, come la luce, non è un'entità fisica, e non si può misurare con mezzi e con metodi obbiettivi.

Al principio di quel secolo XIX, durante il quale tante conquiste la scienza poteva ascrivere al suo attivo, prima ancora che Young e Fresnel avessero portato a termine la loro grande rivoluzione, altri sperimentatori avevano osservato dei fenomeni strani.

Inviando un fascio di luce solare sopra il bulbo di un termometro, questo saliva, dimostrando che si scaldava. L'esperienza era vecchia, e già più volte nei Capitoli precedenti si è visto discutere intorno al fatto che i corpi esposti alla luce ne venivano riscaldati; anzi era stato anche osservato che il riscaldamento era diverso a seconda del colore del corpo illuminato. Ecco dunque che al principio dell'800 si vuol mettere il fenomeno in termini più precisi e si iniziano delle misure: il corpo illuminato è perciò un termometro.

Ma W. Herschel[9] andò oltre: mise vari termometri uno vicino all'altro su un piano e vi proiettò sopra uno spettro solare, in modo che ogni termometro ricevesse una piccola porzione di spettro. Qualche termometro era anche fuori della striscia luminosa e colorata. Ed ecco il fatto nuovo: non solo mostrano di riscaldarsi i termometri sottoposti alle radiazioni dello spettro solare (e quelli sotto il rosso assai più di quelli sotto il verde o il violetto), ma si riscaldano ancora di più quelli fuori dello spettro visibile, dalla parte del rosso, cioè oltre il rosso.

Dunque vi sono dei raggi che non si vedono, e che il prisma devia, e scompone come quelli della luce; dunque nei fasci di luce solare, frammista alla luce rossa, gialla, verde e violetta, che colla sua miscela dà la luce bianca, vi è anche della « luce invisibile ». Essa, come quella visibile, è caratterizzata da una sua rifrangibilità; e precisamente essendo questa nuova luce deviata da un prisma meno del rosso, la sua rifrangibilità è minore di quella di tutte le radiazioni visibili. E così fu scoperta l'esistenza dell'infrarosso.

D'altra parte già da secoli gli alchimisti avevano osservato che i sali di argento, come il nitrato e il cloruro, si annerivano se erano esposti alla luce del sole.

Nel 1777 C. W. Scheele[10] aveva dimostrato che l'effetto su questi sali da parte delle varie luci monocromatiche non era uguale, ma la più attiva era quella violetta.

Nel 1801 il Ritter[11] e poi anche il Wollaston[12] osservarono che proiettando uno spettro solare sopra una lamina di nitrato d'argento, l'annerimento si verificava anche dove l'occhio non vedeva nessuna radiazione colorata, ma solo dalla parte del violetto. Dunque oltre il violetto vi era della luce, più rifrangibile, che si manifestava mediante la sua azione sui sali d'argento, pur non essendo visibile per l'occhio. Anche questa dunque era una « luce invisibile ». E così fu scoperta l'esistenza dell'« ultravioletto ».

Venne la rivoluzione ondulatoria: le luci invisibili vi trovarono facile ospitalità. Misurata facilmente la lunghezza d'onda con le

[9] Sir Frederik William Herschel nacque a Hannover nel 1738 e morì a Slough (Inghilterra) nel 1822.

[10] Carl Wilhelm Scheele nacque a Stralsund (Pomerania) nel 1742 e morì a Köping nel 1786.

[11] Johann Wilhelm Ritter nacque a Samitz in Slesia nel 1776 e morì a Monaco nel 1810.

[12] William Hyde Wollaston nacque a East Dereham, Norfolk nel 1766 e morì a Londra nel 1828.

belle esperienze interferenziali di Young e di Fresnel, si concluse subito che le radiazioni rosse avevano una lunghezza d'onda di 0,8 ~ 0,7 micron, quelle gialle circa 0,6 μ, quelle verdi ancor meno, fino a quelle violette di 0,4 μ; non ci voleva molto ad ammettere l'esistenza di onde più lunghe di 0,8 μ per l'infrarosso e di onde più corte di 0,4 μ per l'ultravioletto. E siccome ai valori compresi fra 0,8 e 0,4 μ corrispondevano le varie luci colorate dei colori dell'iride, le nuove onde più lunghe o più corte furono dette « luci nere ».

Queste scoperte non fecero molto scalpore. Nessuno rilevò quale crisi esse portavano nella concezione che i fisici di allora si erano fatta della luce. Nessuno notò che parlare di « luce invisibile » e di « luce nera » era una contraddizione in termini. Però, le indagini sperimentali continuarono e si moltiplicarono in questi nuovi campi, agevolate dalla introduzione della pila termoelettrica per la rivelazione dell'infrarosso, e dall'affermazione del processo fotografico per l'ultravioletto. Queste indagini spostavano incessantemente i limiti delle lunghezze d'onda producibili e rivelabili. Ed ancora si parlava di luce, come di un'entità costituita da un gruppo centrale di onde visibili e colorate, e di due gruppi laterali neri e invisibili.

La intuizione del Maxwell, di cui abbiamo fatto un rapido cenno, e la susseguente realizzazione sperimentale dell'Hertz conglobarono tutti i tre gruppi suddetti in un complesso che si estendeva fino a onde di chilometri di lunghezza d'onda. La natura elastica delle onde stesse veniva decisamente sostituita da quella elettromagnetica, e il campo delle possibilità si estendeva in maniera impensata. Otto anni dopo le prime esperienze dell'Hertz, nel 1896, il Röntgen scopre i raggi X; a questi fanno seguito presto i raggi γ delle sostanze radioattive. Dopo una lunga ricerca, durata quasi un ventennio, finalmente nel 1914 con l'esperienza ideata dal Laue, ed eseguita dal Knipping si deve concludere che anche questi raggi costituivano dei nuovi gruppi di onde elettromagnetiche di brevissima lunghezza d'onda, qualche cosa come miliardesimi di mm. e anche meno.

La sintesi così ottenuta che praticamente arrivava a comprendere tutte le onde elettromagnetiche da chilometri a miliardesimi di mm. di lunghezza d'onda, deve dirsi veramente colossale; essa rappresenta una delle maggiori glorie della filosofia naturale, anche se poi molti dubbi e molte riserve si sono dovute sollevare contro la

struttura ondulatoria degli elementi di questo enorme complesso. Ma non è su questo argomento che ci dobbiamo intrattenere, perché dobbiamo invece domandarci quale effetto tutto ciò ha avuto sulla « luce ». Un tempo essa era tutto, nel senso che tutto il gruppo di raggi di cui si aveva conoscenza era costituito da entità visibili, luminose, anche se colorate, e soltanto da quelle. Ciò aveva portato gli sperimentatori a una ipotesi tacita, ma non del tutto ingiustificata, almeno in via provvisoria: che fra la luce vista, la *lux*, e l'agente esterno, il *lumen*, vi fosse una corrispondenza, che in un primo tempo si poteva anche considerare eguaglianza, o almeno proporzionalità. In questo ordine di idee non era molto ben fatto, ma non era neppure del tutto fuori di luogo fondere *lux* e *lumen* in una cosa sola, nella « luce ». Dopo tutto, ciò rappresentava un'ipotesi di lavoro, che aveva diritto di cittadinanza nel campo della scienza, come tante altre ipotesi. Sarebbe stato meglio dirlo esplicitamente ma, dal momento che non è stato fatto, bisogna prender le cose come si sono svolte.

Però quando si è dovuto riconoscere che c'era la « luce nera », le cose si complicavano molto: perché essa evidentemente era un *lumen* a cui corrispondeva *lux* nulla. Allora l'ipotesi suddetta cadeva in difetto. Ma ormai l'abitudine a considerare solo il *lumen*, come l'entità interessante, era divenuta così generale, almeno nel campo dei fisici, ed era stato così dimenticato che l'immedesimazione del *lumen* con la *luce* era soltanto un'ipotesi e un'ipotesi molto provvisoria, che il problema non è stato rilevato e le cose sono andate avanti con l'assurdo in seno, continuando a chiamare « luce » il tutto.

Quando poi la luce nera diventò anche onde radiotelegrafiche e radiotelefoniche, e comprese anche i raggi X e i raggi γ, le cose cominciarono a diventare un po' eccessive.

La soluzione adottata è stata assai semplice: non si è rilevato niente, si è evitato di definire che cosa si intendeva per « luce », e si è continuato a parlare il vecchio linguaggio. Quando qualcuno chiedeva schiarimenti, e rilevava qualcuna delle innumerevoli incongruenze che derivavano dal mantenere questi equivoci fondamentali, si usava rispondere: « Questioni di parole; non vale la pena di occuparsene ».

Ed invece vale molto la pena di occuparsene. Non sono questioni di parole, ma questioni di fatti e di concezioni basilari, che hanno un'origine profonda e lontana nella lunga storia di cui in

questo volume sono segnalate le tappe più notevoli e più appariscenti, ma che evidentemente ha tenuto occupata la mente dei più potenti pensatori dell'umanità di tutti i tempi.

Ecco perché a chiusura della storia che abbiamo rievocato poniamo la domanda: « Che cos'è, dunque, la *luce*? ».

Perché pensiamo che un'inquadratura finale della questione come noi la vediamo oggi, possa valorizzare la condizione particolarmente favorevole in cui il lettore si trova per aver seguito l'evoluzione delle idee durante i ventiquattro secoli scorsi.

Di luce si è cominciato a parlare come conseguenza del fatto che l'uomo « vede ». È sorta così la nozione di buio e di luce, come di due « condizioni » di cui una è l'assenza, la negazione dell'altra.

Per molto tempo si cercò di conoscere come si faceva a « vedere ». Fu palese fin da principio che chi vedeva era l'anima, la mente, la psiche dell'individuo, e il problema consisteva nel definire come questa venisse a conoscere la forma, i colori e la posizione dei corpi, anche molto lontani che essa vedeva. Si pensò ai raggi uscenti dall'occhio che andavano ad esplorare il mondo esterno, e alle « eidola » che dagli oggetti entravano entro l'occhio. Ma di luce, come entità a sé stante, non se ne parlava. Non esisteva il problema di trovare che cosa fosse la luce. Però, già nei discorsi grossolani di Lucrezio si cominciava ad affermare l'esistenza di un quid fisico che interveniva come elemento determinante della visione. Ma erano idee appena embrionali e indefinite. Stabilito da Alhazen che l'occhio funzionava sotto l'azione di un agente esterno, a cui si doveva l'apporto della forma e dei colori del corpo osservato, per molti secoli ancora si cerca di conciliare questa concezione con le « eidola », traendone meccanismi complicati e insoddisfacenti, in cui però comincia ad affiorare il concetto di qualche cosa di rettilineo, di raggio luminoso, necessario come per guidare le « eidola » dentro l'occhio, riducendone le dimensioni opportunamente per farle entrare nella pupilla.

Questo si può dire il primo modo di considerare il *lumen*; ma si aggiungeva sempre che le « eidola » entrate nell'occhio, si facevano sentire dalla retina, e qualche cosa fluiva lungo il nervo ottico, fino al cervello, fino alla psiche, a cui spettava il compito di creare le figure che si vedevano, come fantasmi, nel posto dove si vedevano, con la forma e coi colori portati dalle « eidola » cor-

rispondenti. E queste figure erano la *lux*, vista in quanto creata dalla psiche. Si era anche trovato che la psiche poteva vedere senza l'azione esterna, in quanto creava i fantasmi di sua iniziativa, come nei sogni, nelle allucinazioni, nelle illusioni.

Il Keplero dette la chiave del meccanismo della visione. Le « eidola » tramontarono, ma l'idea generale restò. Una comunicazione geometrica si stabilì fra gli elementi dell'oggetto osservato e quelli della retina, comunicazione costituita da coni di raggi rettilinei, ciascuno col vertice in un elemento, trasformati dal sistema ottico dell'occhio in altri coni convergenti ciascuno in un elemento di retina. Questi raggi, provvisoriamente soltanto rettilinei e geometrici, costituivano il *lumen*, erano l'agente che portava alla retina le forme e i colori dei corpi esterni; ma dopo, ancora dalla retina, qualche cosa doveva fluire lungo il nervo ottico, fino alla psiche, perché questa, proprio dall'analisi dello stimolo sulla retina e degli sforzi di accomodazione e di convergenza fatti dagli occhi per vedere nitido e per non vedere doppio doveva dedurre dove si trovava la sorgente dei raggi, cioè il luogo dei vertici dei coni che erano giunti alla pupilla, e là doveva collocare le figure, i fantasmi che essa creava, di conseguenza. La spiegazione delle figure viste dietro gli specchi, al di là dei prismi e delle lenti era la più bella e la più convincente delle dimostrazioni che il meccanismo così ideato corrispondeva alla realtà.

La *lux* era ancora confinata nella psiche, era ancora un fenomeno psichico; il *lumen* diventava ora un fenomeno fisico in parte definito, e in parte da definirsi: i due erano collegati da un fatto fisiologico, perché l'occhio era necessario per passare dall'uno all'altro. La « visione » così assumeva il carattere di un processo multiplo, in cui concorreva un fattore esterno, fisico, che era il *lumen*; un organo fisiologico, l'occhio; un'entità assai misteriosa, ma necessaria, la psiche. A quest'ultima era ancora riserbato il compito di creare la *lux*.

Il problema di definire la natura del *lumen* è ora posto nella sua pienezza. Prevale l'opinione che si tratti di corpuscoli materiali, e l'ipotesi prende molto sviluppo e acquista molto credito, perché dopo che padre Grimaldi ha dimostrato essere i colori una modificazione del *lumen*, Newton propone la sua idea nuova, che i colori non sono proprio una modificazione del lume, ma sono soltanto l'effetto fisio-psicologico dell'azione della diversità di massa dei corpuscoli stessi sull'occhio dell'osservatore.

La bellezza delle esperienze e delle teorie collegate con questa concezione, e soprattutto il sopravvento che la « filosofia naturale » ebbe nei secoli XVII e XVIII spostarono tutta l'attenzione del mondo scientifico sul *lumen* e questo divenne la « luce », e della *lux* si perse ogni traccia.

Cadde la teoria che considerava la luce fatta di corpuscoli materiali, e prevalse quella che la considerava fatta di onde. Si scoprì che di onde non vi erano soltanto quelle capaci di impressionare l'occhio, ma ve ne erano altre, moltissime altre, della stessa natura, che sull'occhio non producevano alcun effetto, dalle onde radio all'infrarosso; dall'ultravioletto ai raggi X e ai raggi γ. Si riconobbe che si trattava di una forma di trasmissione dell'energia, che costituiva uno dei meccanismi fondamentali dell'Universo.

Sintesi meravigliosa dal punto di vista fisico; ma gravida di conseguenze per la « luce ». Se luce si era chiamato quel gruppo di onde capaci di impressionare l'occhio, era giusto chiamare « luce nera » quelle onde che non lo impressionavano?

Contemporaneamente l'assestamento della fotometria, che, sorta con lo scopo di « misurare la luce » aveva finito col ripiegare sopra una convenzione, poneva la domanda: è giusto chiamare « luce » quella certa entità che si determina con le manipolazioni sperimentali e numeriche dettate dalle regole fotometriche attuali?

Una domanda analoga sorge a proposito delle conclusioni a cui è giunta la colorimetria: è giusto chiamare « colore » quella entità a cui si arriva con le manipolazioni sperimentali e numeriche stabilite dalle regole colorimetriche attuali?

Per rispondere a queste domande, conviene esporre il processo della visione, nelle linee generali, che inquadrano ciò che tanti secoli di ricerca ci hanno permesso di considerare come noto.

Dobbiamo immaginarci un mondo esterno, in cui si trovano i corpi materiali, dotati di movimento, e di energia. Questo mondo dobbiamo pensarlo buio; privo di luce e di colore. I vari corpi debbono essere considerati come nubi di atomi che irradiano dell'energia, sotto forma di onde (o di fotoni, poco importa per il nostro scopo) di ogni lunghezza d'onda. Queste onde sono da considerarsi energia che si trasferisce da un corpo a un altro; perciò non sono né luminose, né colorate: sono tutte buio. Quelle di queste onde che hanno una lunghezza d'onda compresa fra 0,4 e 0,8 micron, pur essendo prive di luminosità e di colore (ché non

si saprebbe neppure che significato dare alla frase « onda luminosa in sé », o « onda colorata in sé »), sono atte a provocare certe reazioni sulla retina degli occhi che eventualmente incontrano. Queste reazioni provocano la trasmissione di impulsi nervosi dagli occhi al cervello. Nel cervello, o organo sensorio centrale, avviene una profonda e minuziosa elaborazione di questi impulsi; ne viene considerata l'intensità, la provenienza, la complessità, e come conclusione viene creato un complesso di fantasmi luminosi e colorati. Più precisamente gli impulsi nervosi provenienti da un unico elemento di retina sono definiti da tre parametri, di cui uno viene rappresentato come splendore, uno come tono di colore, e uno come saturazione. Tanti sono gli elementi di retina impressionati e tante sono le trasmissioni contemporanee all'organo centrale (nel nervo ottico sono state contate 500.000 fibre, capaci di trasmettere impulsi indipendentemente). Così la psiche, sulla base di tutte queste terne di impulsi costruisce altrettanti elementi, che nel loro complesso costituiscono il fantasma creato, dotato di brillanza, di tono di colore e di saturazione in ogni elemento. Dalla fusione dei fantasmi ottenuti coi due occhi, dallo sforzo di accomodazione, necessario per portare al massimo di nitidezza le varie parti delle figure così create, col concorso di altri elementi fisiologici e soprattutto psicologici, come la memoria, e l'immaginazione, la psiche riesce anche a misurare la distanza a cui la sorgente delle onde si trovava dall'occhio: e come conclusione di questo lungo, minuzioso, e meraviglioso lavorio, il fantasma viene collocato dove è stata individuata la posizione della sorgente.

Allora l'« io » che ha creato questi fantasmi e li ha collocati intorno a sé, *vede* intorno a sé lo spazio popolato di queste figure luminose e colorate [13].

Ecco il processo della visione nella sua complessità inscindibile, costituita di una fase fisica, una fisiologica e una psicologica.

La luce e il colore esistono soltanto nella fase psicologica. Sono

[13] Chi desideri approfondire la dimostrazione del meccanismo della visione, secondo lo schema qui riassunto, può consultare: V Ronchi, *L'ottica scienza della visione*, Zanichelli, Bologna 1955; V. Ronchi, *Optics, the Science of vision,* translated by Edward Rosen, New York University Press, 1957; V Ronchi, *Optique, science de la vision*, Masson & C., Paris in corso di stampa; *Critica dei fondamenti dell'acustica e dell'ottica*, Centro Didattico Nazionale per l'Istruzione Tecnica e Professionale, Roma 1963.

entità esclusivamente, assolutamente soggettive. Esse perciò non fanno parte del mondo esterno, e non possono rientrare nel dominio della fisica.

Risulta da questa conclusione quanto sia stato deleterio l'aver persa per via la preziosa distinzione dei nostri avi medioevali fra *lumen* e *lux*. Se vogliamo mettere a posto i concetti, occorre ripristinare una duplice nomenclatura: occorre conservare alla parola « luce » il significato di *lux*, di ciò che è contrario al buio; perché in questo senso tutti la intendono. Uno potrebbe anche obbiettare che si potrebbe anche stabilire una convenzione diversa, quale quella di riserbare al termine « luce » il significato di *lumen*; come i fisici hanno inteso di fare. Ciò però richiederebbe che si introducesse un altro termine per indicare la *lux*, e siccome « quella che si vede » tutti la chiamano luce, sarebbe molto arduo far entrar nell'uso la parola nuova.

Invece è facile, quando si voglia, usare una parola diversa da « luce » per indicare il *lumen*: essa è « radiazione », o anche « energia raggiante ».

Si arriva così alla conclusione: il mondo fisico è percorso dalla radiazione, che è priva di luce e di colore; il mondo fisico è nero e buio. Quando quelle radiazioni particolari che hanno quelle certe lunghezze d'onda comprese fra 0,4 e 0,8 micron arrivano alla psiche umana attraverso l'organo della vista, vi provocano la formazione di fantasmi luminosi e colorati; ossia di luce e di colore.

E la « luce » dei fotometristi? È radiazione? È luce? Non è né l'una, né l'altra. Non è luce, perché abbiamo visto che è una entità esterna, oggettiva, indipendente dall'osservatore. E non è neppure radiazione semplicemente, perché tien conto della sensibilità dell'occhio, sia pure di un occhio convenzionale. Essa è una certa manipolazione, una funzione della radiazione che vorrebbe rappresentare l'effetto di questa sopra un occhio meccanico, invariabile fisiologicamente e indipendente dal meccanismo psichico. Si può dire che è la radiazione in quanto è sentita dall'occhio convenzionale. Forse la maniera più sintetica di rappresentarne il significato è contenuta nella frase « radiazione ottica ». È stata anche proposta la frase « radiazione visibile », ma non è preferibile a quella precedente, perché in realtà nessuno è mai riuscito a veder qual-

siasi radiazione, e quindi anche quelle capaci di stimolare l'occhio umano non si possono dire « visibili » [14].

Con questo si vuol dire che la radiazione in genere può essere rivelata mediante numerosi rivelatori o ricettori: dagli apparecchi radioriceventi, alle pile termoelettriche, ai bolometri, ai radiometri, alle celle fotoelettriche; dalle emulsioni fotografiche, alle camere di ionizzazione: l'occhio è anch'esso un ricettore.

Alcuni ricettori assorbono tutta la radiazione che ricevono, e la trasformano; essi sono detti « ricettori integrali »; altri sono invece « selettivi », perché assorbono solo certe radiazioni, e anche queste più o meno, a seconda della loro lunghezza d'onda. Sono ricettori selettivi per esempio le celle fotoelettriche, le emulsioni fotografiche; e anche l'occhio.

L'espressione combinata della intensità della radiazione per la sensibilità selettiva del ricettore si calcola mediante una opportuna integrazione. Nel caso di una cellula fotoelettrica, essa ci dà l'intensità della corrente che verrà erogata quando essa cellula sarà sottoposta al fascio di radiazione considerato. Nel caso di una emulsione sensibile, ne segue l'annerimento che su questa si riscontrerà dopo lo sviluppo. Nel caso dell'occhio, ne viene la misura di un effetto analogo ai precedenti, che potrebbe dirsi l'alterazione dello strato retineo colpito da quella radiazione; i fotometristi, postulando una corrispondenza univoca fra questa alterazione e la luce che il soggetto vedrebbe, hanno chiamato « luce » il risultato delle loro misure e dei loro calcoli.

Bisogna riconoscere che, nonostante le numerose riserve che si debbono fare a questo riguardo, si tratta di manipolazioni e di operazioni praticamente molto utili.

Naturalmente nella pratica le cose non sempre vanno bene; e finalmente anche in questo campo si è sentita la necessità di distinguere ciò che è nell'ambito fisico, da ciò che è nel mondo psichico: è recente l'introduzione di un gruppo di grandezze nuove, parallelo a quello già in uso nella fotometria, e ciò per indicare separatamente *ciò che c'è*, rivelabile mediante strumenti inanimati, e *ciò che si vede*, come lo indica un osservatore vivente.

Così per indicare quella grandezza che serve per rappresentare

[14] Per maggiori chiarimenti sul significato fisico della « luce » definita in fotometria, consultare: V Ronchi, *Precisazioni e proposte a proposito delle misure fotometriche*, « L'Elettrotecnica », settembre 1946.

in modo preciso il « chiarore » che uno vede sopra una superficie luminosa o illuminata, dopo lunga tergiversazione si è dovuti giungere a coniare due termini *luminanza* e *brillanza*. Il primo indica la grandezza fisica, come l'abbiamo descritta qui sopra; il secondo quella psichica. Così finalmente si potrà dire che il fenomeno ben noto dell'adattamento all'oscurità, per cui un occhio, passando da un ambiente chiaro in uno molto scuro, col trascorrere del tempo diventa sempre più sensibile, e quindi vede sempre meglio le deboli luci dell'ambiente, che pur sono dovute a sorgenti fisicamente costanti, oggi si può esprimere adeguatamente, dicendo che la brillanza aumenta col tempo, mentre la luminanza rimane costante.

Le idee così sono assestate, ma la luce è divenuta un quid molto evanescente. Fino al punto che se uno insistesse nella domanda: che cos'è dunque la « luce »?, saremmo costretti a confessare che non vi è nulla di definito, a sé stante, a cui ragionevolmente dare questo nome.

Perché, escluso che questo nome si possa dare all'agente esterno, che si deve chiamare « radiazione », escluso che sia vera luce quella manipolazione che i fotometristi fanno della radiazione, per i loro scopi sperimentali e tecnici, dovremmo cercare nel mondo psichico il quid a cui dare questo nome.

Ebbene nel mondo psichico che ci riguarda noi troviamo soltanto questo: dei fantasmi dotati di brillanza (proprio nel significato moderno della parola, come si è detto poco sopra), di un dato tono di colore e di una certa saturazione. Non vi è niente che fluisce, tra psiche e fantasma, che possa chiamarsi luce.

Cosicché a questa parola non rimane che il significato di « assenza di buio »; quello stesso significato che le avevano attribuito i filosofi di due millenni addietro. Esservi luce significa soltanto che la psiche non sta inoperosa, e crea i suoi fantasmi.

Forse, anche soltanto in sogno.

Indice del volume